

Staatliches Amt für
Landwirtschaft und Umwelt
Mittleres Mecklenburg

Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg

Dezernatsgruppe Küste

Dezernat Allgemeine Angelegenheiten und Küstenkunde

Erich-Schlesinger-Str. 35

18059 Rostock

LEDA-K2: Laserscanaufnahmen durch Einsatz von Drohnen (UAV) zur Aufnahme von Küstengebieten und Entwicklung von teilautomatisierten Softwareverfahren bei der Luftbildauswertung aus UAV-Befliegungen

Schlussbericht

Tiepolt, Lars; Kittel, Oskar

Förderkennzeichen 03KIS105
Laufzeit des Projektes und Berichtszeitraum: 01.05.2013 - 31.01.2014

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Hintergrund

Bisher kamen im Küstenschutz von Mecklenburg-Vorpommern zur Aufnahme der Morphologie und zur Vermessung von Küstenschutzanlagen neben den klassichen tachymetrischen Messverfahren hauptsächlich Airborne Laserscanning (ALS) und vereinzelt terrestrisches Laserscanning zum Einsatz.
Bei der tachymetrischer Vermessung wird der Vorteil der hochgenauen Aufnahme von Objekten inklusive der Attributierung durch die überwiegenden Nachteile von wenigen Punkten pro Fläche, hoher Zeit- und Kostenaufwand und der Notwendigkeit der Interpolation von Zwischenflächen zunichte gemacht.
Andererseits wird bei der ALS-Vermessung eine sehr große Fläche in kurzer Zeit aufgenommen, hier fehlen aber dann die Attributierung der Punkte sowie die hohe Genauigkeit und es besteht das Problem der Verfügbarkeit von Flugzeugen/Hubschraubern zum gewünschten Zeitpunkt. Bei zu kleinen Flächen liegen die Mob-/DeMobkosten bzw. An- und Abflugkosten oft über den tatsächlichen Befliegungskosten.
Das terrestrische Laserscanning als Mittelweg durch die Aufnahme einer hohen Punktdichte bei einer größeren Fläche mit schnellerer Verfügbarkeit (als beim ALS) aber mit reduzierter Genauigkeit gegenüber tachymetrischen Verfahren und mittlerem Zeit- und Kostenaufwand ist für kleinflächige Objekte eine gute Alternative, für größere und insbesondere langgestreckte Objekte, wie Dünen und Deiche, auch keine befriedigende Lösung.
Die Technikentwicklung der letzten Zeit hat nun 2 weitere mögliche Aufnahmeverfahren zur Marktreife gebracht, deren Anwendung gerade für die Aufgaben des Küstenschutzes, nicht nur in MV sondern in allen Küstenländern, theoretisch vielversprechende Ergebnisse erwarten lässt, zum einen ist dies das Mobile Laserscanning (MLS) und der Einsatz ferngesteuerter Drohnen. Im Projekt LEDA-K wurden diese erfolgversprechenden Verfahren exemplarisch an ausgewählten Küstenschutzstandorten getestet, um entweder ihre praxisrelevante Nutzbarkeit zu bestätigen und damit eine Grundlage für detaillierte Forschungen und Anwendungen zu schaffen oder eben diese Verfahren für Belange des Küstenschutzes in der jetzt vorliegenden Technologie auszuschließen.

2. Aufgabenstellung

Die Dezernatsgruppe Küste des Staatlichen Amts für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg hatte neben der Koordination der externen Projektpartner Milan Geoservice GmbH Spremberg und CIS GmbH Rostock alle Arbeiten im Projekt zu begleiten, zu bewerten, notwendige Änderungen an den Fluggeräten durchzuführen sowie die angewendeten Hard- und Softwareprodukte zu testen. Es war darauf zu achten, dass in dem sehr kurzen Projektzeitraum von nur 9 Monaten alle beantragten Arbeiten und Forschungen durchgeführt werden konnten.

Folgende Fragestellungen/Aufgaben waren zu bearbeiten:

- Mit allen Laserscannern war zunächst die Performance mit dem IMU/GPS-System der Trägerplattform festzustellen. In einem weiteren Schritt galt es den Qualitätszuwachs durch Integration einer leistungsstärkeren IMU-Einheit zu bestimmen (hierzu sollte das Modell HG1700 der Firma Honeywell verwendet werden).
- Der größte Forschungs- und Entwicklungsbedarf bestand bei der Kopplung der IMU/GPS Daten mit den Laserdaten, da die Orientierungswinkelbestimmung mit einer Mini-IMU, wie sie auf Drohnen aufgrund des geringen Gewichtes zur Anwendung kommen, qualitativ kaum ausreichend sind. So werden u.a. die Orientierungswinkel bei den derzeit in LEDA-K eingesetzten Drohnen mit **einer** Nachkommastelle ausgegeben, bei konventionellen ALS-Befliegungen aber mindestens mit **vier** Nachkommastellen. Hier musste ein Verfahren zur Optimierung und Annäherung der Genauigkeiten entwickelt werden.
- Nach der Verschneidung der IMU- und Laserdaten liegen die gescannten Spuren verdreht zueinander, was aber durch geeignete Spuranpassungs-Algorithmen im Nachhinein angepasst werden kann und Stand der Wissenschaft/Technik ist. Beim Einsatz der kleinen ALS-Laser ist aber zu erwarten, dass innerhalb der Spuren extreme Schwankungen auftreten werden, wodurch diese verdreht, gestaucht und verzehrt werden. Dieser Missstand ist im Nachhinein derzeit nicht mehr zufriedenstellend zu beheben und war deshalb ein Untersuchungsschwerpunkt in LEDA-K2, wobei derzeit eine komplette Problemlösung nicht zu erwarten war, es aber eine Reihe von Ansätzen aus Modellbefliegungen der Firma Milan Geoservice GmbH mit speziellen, größeren Koptern (25 kg) gibt. Für die Umsetzung auf UAVs sind bereits Lösungen konzipiert worden (u.a. Orientierung mit Hilfe einer Kamera durch die Aufnahme von Passpunkten), die aber noch nicht erforscht worden sind.
- Ein weiterer Forschungsansatz war die Entwicklung der Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten (IMU, Laserscanner, Datenaufzeichnungseinheit) sowie die Verbindung mit dem GPS-Signal der Trägerplattform.

Dafür sollte eine miniaturisierte Recheneinheit gesucht oder entwickelt werden, welche sowohl als Verbindungsstelle der einzelnen Sensorsysteme dient als auch die Datenaufzeichnung bewerkstelligt. Diese Recheneinheit müsste den aus der Flugplanung bekannten Flugstreifen automatisch ansteuern und die reibungslose, kontinuierliche Datenaufzeichnung gewährleisten. Ebenso war eine Überwachung der Sensordaten und ggf. ein Eingreifen in die Systeme vom Boden aus zu realisieren. Hierzu musste eine drahtlose Kommunikation zu einer Bodenstation eingerichtet werden.

Software

Bei den Softwarepaketen ist international ein Trend von UAV (Unmanned Aircraft Vehicles) zu UAS (Unmanned Aircraft Systems) zu verzeichnen. Das bedeutet, dass die Software an Bedeutung gewinnt, eine Software, die sich mit Flugplanung, Flugdurchführung und Flugauswertung beschäftigt. Komfortable Software stellt sich auf die Anwenderproblem-stellung ein und bindet sich in Verfahren der Nutzer ohne Medienbrüche ein. Genau diese Problematik bei der Software mit den derzeit für die Küstenanwendungen spezifischen Fragestellungen hat im 1. Projekt LEDA-K erhebliche Probleme bei der Datenauswertung gemacht, da die vorhandenen und auch extra für das Forschungsprojekt zusätzlich eingesetzten Softwarepakete (u.a. Photomod) keine befriedigenden Lösungen hervorgebracht hat, so dass im Endeffekt die guten Ausgangsdaten durch unzureichende, ungenaue und zeitaufwendige Algorithmen bei der Verarbeitung einen starken Qualitätsverlust erfahren haben.

Gegenwärtig verwendete Softwarepakete arbeiten relativ stabil, wenn sie mit hochwertigen Bildern und genauen Messwerten beschickt werden. Sie sind aber oft nicht in der Lage, ungenaue oder fehlerhafte Messwerte oder unscharfe Bilder zu erkennen und auszusondern. Sie reagieren oft erst nach längeren Berechnungen mit einem fehlerhaften Ergebnis. Hier bestand ein weiterer Forschungsansatz durch:

- Entwicklung von Möglichkeiten zur Teilautomatisierung der 3D-Modellierung
- Genauigkeitssteigerung durch hochgenaue Positionierung und Kalibrierung der Messsysteme an den vorhandenen Modelldaten
- Kombination von Hardware und Software mit einem hohen Automatisierungsgrad, zugeschnitten auf spezielle Fragestellungen des Küstenmonitorings

Weiter zu bearbeitende bzw. neue Fragestellungen waren u.a.

- Erhöhung des Automatisierungsprozesses bei Flugplanung und Befliegung
- Weiterentwicklung der Datenauswertungsverfahren
- Erhöhung der Programmunterstützung und Beschleunigung der Datenauswertungs- und Modellierungsprozesse
- Welche zusätzliche Sensorik verspricht Erkenntnisgewinn und wie kann sie eingesetzt werden?
- Welche Möglichkeiten der beschleunigten Auswertung bzw. der Automatisierung der Auswertung können erschlossen werden?
- Wie kann Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Plausibilitätskontrolle für das System, an unsere Problemstellungen orientiert, weiter gesteigert werden?
- Wie kann der vorhandene Datenbestand angefangen von topographischen Karten und Orthofotos bis hin zum spezifischen 3D-Modell sinnvoll für Flugplanung und Flugauswertung genutzt werden?

Entwicklung Teilautomatisierter Auswerteverfahren

Es existieren insbesondere an Universitäten und Hochschulen verschiedene Ansätze Luftbilder von Drohnen für die photogrammetrische 3D-Rekonstruktion von Objekten (meistens Gebäude) zu verwenden. Einen gewissen Überblick dazu liefert http://www.lc3d.net.

Bisher wurden erste Erfolge erzielt, aber keine praktikablen Lösungen erarbeitet. Mit entsprechendem FuE-Aufwand kann unter Einbeziehung offener Forschungsergebnisse eine effiziente 3D- Lösung mit einem hohen Automatisierungsgrad erarbeitet werden.

Bei der CIS GmbH gibt es bereits einen relativ hohen Automatisierungsgrad für die Drohnennutzung zur Gewinnung von 2D-, RGB- und NIR-Bildern, deren Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsparameter für unsere Fragestellungen verbesserungsbedürftig und verbesserungsfähig sind.

Einsatzmöglichkeiten teilautomatisierter Softwarelösungen im Küstenschutz

- Erstellung und Pflege eines georeferenzierten feinmaschigen digitalen Oberflächenmodells des Küstenstreifens
- Planung, Durchführung und Auswertung von stereoskopischen Bildflügen
- Kombinierte Befliegungen mit anderen Sensoren (z.B. Infrarot-Aufnahmen, Bodentemperatur)
- Ableitung zeitlicher Veränderung aus dem Modell, Prognose der Weiterentwicklung
- Ableitung von Maßnahmen zur Verhinderung ungewünschter Entwicklungen

Folgende Fragestellungen waren in dem Forschungsprojekt zu beantworten:

- Verbesserungsmöglichkeiten für die Flugplattform
  - Einsatz von differential GPS zur Erhöhung der Lagegenauigkeit
  - Höhenmessung über Grund zur Einbeziehung in die Bildauswertung
  - Messung der Relativgeschwindigkeit gegen die umgebende Luft zur Flugstabilisierung
  - Verbesserung der Messgenauigkeit der Neigungswinkel durch neue Kalibrierungsverfahren andere Sensoren und Software
- Softwareentwicklungsbedarf
  - Anpassung der Flugbahn an den Küstenverlauf auch bei Wind realisierbar?
  - Zusätzliche Einsatz von HD-Videos oder mehreren Kameras für die Verbesserung der Genauigkeit der Modellierung
  - Gestaltung der teilautomatisierten Stereobildauswertesoftware mit den Zielen: hohe Genauigkeit, hohe Zuverlässigkeit, leichte Plausibilitätskontrolle, Kombination mit Modellierungssoftware
  - Modellauswertungssoftware

3. Wissenschaftlich-technischer Stand

Stand der Technik:

Flugzeuggetragene klassische und digitale Luftbildsysteme sind bei kleineren Gebieten (Einzelobjekte bis einige 100 ha) sehr teuer und durch die große Wetterabhängigkeit nicht flexibel genug. Oft ist gerade eine hohe Zeitnähe sehr wichtig, z.B. zur Ermittlung von Momentanzuständen, u.a. nach Sturmfluten, Starkregenereignissen, Überschwemmungen und anderen Katastrophen sowie menschlichen Tätigkeiten im Gebiet.

Eine preiswerte und flexible Alternative dazu sind autonome, unbemannte Flugobjekte (UAV), die in niedrigen Höhen und unter den Wolken operieren können und damit weitgehend wetterunabhängig sind. Ein wesentlicher Schritt hin zu verwertbaren Lösungen unbemannter Fluggeräte ist die Entwicklung von miniaturisierten autonomen Steuerungen, die per GPS und inertialer Messtechnik (Inertial Navigation System INS) auch eine selbständige Flugführung ermöglichen. Über programmierbare Autopiloten könnten so systematische und koordinatenbezogene Aufnahmen gemacht werden, da bei nur vom Boden aus gesteuertem Modellflugzeug die Navigation und Auslösesteuerung (auch über eine Videovorschau) nie exakt systematisch sein kann.

Jedoch ist der spezielle Aufwand, ein UAV für fernerkundliche bzw. photogrammetrische Zwecke einzusetzen recht groß, da es an die jeweilige Fragestellung angepasster, hardwareseitiger Tests und Entwicklungen bedarf bzw. methodische Untersuchungen fehlen, um geeignete Lösungen zu finden.

Erst die Kombination von digitaler Photogrammetrie und dem Airborne-Laserscanning in Verbindung mit unbemannten Flugkörpern (UAVs) bringt die notwendige Genauigkeit, Schnelligkeit und Informationsvielfalt für ein technologisch motiviertes Vermessen in diversen Bereichen wie z.B. dem Umweltmonitoring, dem Küsten- und Katastrophenschutz sowie darüber hinaus für viele weitere Anwendungen in Industrie und Wirtschaft.

Einsatzmöglichkeiten ALS mit Drohnen im Küstenschutz und ggf. darüber hinaus sind:

- Bauwerks- Kontroll- und Deformationsmessungen
- Vermessung für Archäologie und Baudenkmalpflege
- Erfassung von Hafen- und Industrieanlagen
- Erfassung und Kontrolle von Ufer-, Strand- und Küstenprofilen im Rahmen eines effizienten Küstenschutzes
- Katastrophenschutz und schneller Einsatz bei Unfällen bzw. nach Unwettern
- Erstellung von Orthophotokarten
- Erstellung digitaler Geländemodelle
- Bestandseinmessungen

Folgende weitere Fragestellungen waren in diesem Forschungsprojekt zu beantworten:

In den letzten Jahren sind UAVs nur sehr sporadisch in das Blickfeld zivil genutzter Photogrammetrie gelangt. Ansätze und Ergebnisse unterschieden sich stark in Abhängigkeit des verwendeten UAV und der jeweils an Bord befindlichen Sensorik, z.B. digitale Kamera und GPS/INS. Je nach Genauigkeit des GPS und des inertialen Messsystems (INS) können die Daten im Rahmen einer Aerotriangulation unterschiedlich intensiv zur Automation und zur Genauigkeitssteigerung genutzt werden.

Die größten Schwierigkeiten in der photogrammetrischen Verarbeitung von einzelnen Bildern und Bildverbänden, welche mit UAVs aufgenommen wurden, sind:

- unsystematisch aufgenommene bzw. verkippte Bilder, welche z.B. bei windigen Verhältnissen oder durch eine unzureichende Stabilisierung/Orientierung der Sensorik hervorgerufen werden.
- Veränderungen in der inneren Orientierung der Kamera zwischen und vor allem während der Bildflüge.
- Keine oder nur sehr ungenaue Startwerte des GPS (ggf. auch INS) für eine Aerotriangulation
- Schwierigkeiten in der Passpunktbestimmung (Anzahl, Genauigkeit, Verteilung)

Es ist die komplette Miniatursensorik für den technischen Input des UAV zu entwickeln / zu testen. Hierzu zählen u.a. das GPS, das Inertialsystem INS, Kleinlaserscanner, digitale RGB-Kameras sowie die Funkfernsteuerung.
Es sollten etwa 3 verschiedene Laserscanner verschiedener Bauart und Auflösung mit Single bzw. Multibeam auf ihre Eignung getestet werden. Dazu wurden in zeitlichen Abständen diverse Test- und Kalibrierflüge durchgeführt. Die jeweilig gewonnenen Ergebnisse und Daten sollten prozessiert und ausgewertet werden. Dabei sollten die notwendigen Hardware-Kalibrierungsverfahren zur Sicherung erforderlicher Genauigkeits-anforderungen entwickelt werden.
Neben der reinen **photogrammetrischen Softwareentwicklung** im folgenden 2. Projektteil, waren auch beim Einsatz von Kleinstlasern in Drohnen eine Reihe von Fragestellungen beim Einsatz und der Weiterentwicklung von (teilautomatisierten) Softwarelösungen zu bearbeiten. Neben dem klassischen Verfahren der Aerotriangulation zur Georeferenzierung von Bildverbänden sind in den letzten Jahren andere Verfahren entwickelt worden, die entweder darauf setzen, dass für das beflogene Gebiet bereits Orthophotos existieren und über einen mehr oder weniger automatisierten Vergleich eine Georeferenzierung möglich ist, z.B. Modul Autosync / ERDAS Imagine, oder darauf, dass bei einer entsprechenden Überlappung der Bilder teilautomatisch eine relative Orientierung möglich ist. Insbesondere bei Monitoringaufgaben ist eine automatisierte Referenzierung einer aktuellen Aufnahme auf eine bestehende Aufnahme eine interessante Alternative. Allerdings besteht hier noch Forschungsbedarf, um die Zuverlässigkeit des Matchings bei Bildern, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden, zu erhöhen.

Einsatzmöglichkeiten teilautomatisierter Softwarelösungen nach Drohnenbefliegung mit Kleinstlasern im Küstenschutz

- Entwicklung von Algorithmen und Parametern zur luftgestützten Bestimmung von Strand-/Dünenprofilen und Bruchkanten
- Nutzung von Bilddaten für geometrische Messungen, Erfassungen und Überwachung von lokalem Gefahrenpotential im Rahmen eines effizienten Küstenschutzes und Küstenmonitorings
- Erfassung von lokalen Umbildungen (z.B. Bruchtrichter)
- gezieltere Oberflächenkartierung im Bereich der Geologie
- Durchführung von exakten Analysen und genaue Beobachtung von Oberflächen

Stand der Entwicklung von ALS-Drohnen

Bisher kommen ALS-Drohnen größtenteils in der Forschung vor. Es gibt Systeme die schon einige gute Ergebnisse liefern. Diese haben „miniaturisierte" Komponenten, welche zusammen immer noch ein hohes Gewicht haben.

Bsp. eines Miniatur-Laserscannersystems: -Scanner Riegl Q160 → 4,6 kg
-IMU → 1-2 kg
-Rechnereinheit → 2-3 kg
-Stromversorgung + Kabel → 2-3 kg

Hierfür wird eine entsprechende Drohne benötigt, welche eine Nutzlast von mindestens 15 kg tragen muss. Diese, meist Helikopterdrohnen, haben Größen von 3 m Länge und Rotordurchmesser sowie eine maximales Abfluggewicht (maximum takeoff weight [MTOW]) von bis zu 100 kg.

Bespiele hierfür wären:

Tab. 3.1: Überblick einer Auswahl von L-Class UAVs

Parameter	Aeroscout Scout B1-100	Geocopter GC-201	SURVEY Copter Copter4	Swiss UAV Neo S-300
Länge	3,3 m	2,9 m	2 m	2,75 m
Rotordurchmesser	3,2 m	3,3 m	2,2 m	3 m
Höchstabfluggewicht	75 kg	90 kg	30 kg	100 kg
Nutzlast	30 kg	30 kg	10 kg	35 kg
Flugdauer	90 min	90 min	60 min	90 min

Da man bei einem MTOW von über 25 kg eine Ausnahmegenehmigung der zuständigen Luftfahrtbehörde benötigt, ist der reibungslose Betrieb eines solchen Systems nicht immer gegeben.

Daher ist es sinnvoll noch kleinere und damit leichtere Komponenten zu verwenden, um unter 25 kg zu kommen. Das Problem hierbei ist, dass die Performance bei noch kleineren Scannern (als z.B. der Q160) sehr stark abnimmt. Besonders die Reichweite ist bei extrem kleinen und leichten Scannern äußerst gering:

Tab. 3.3: Überblick Laserscanner

Parameter	Hokuyo UTM-30LX	Sick LD-MRS	Riegl LMS-Q160	Riegl LMS-Q240i
Reichweite in m	60	250	200	650
Genauigkeit in mm	50	100	20	20
Effektive Messrate in Hz	40	50	10000	10000
Öffnungswinkel in °	270	85	80	80
Abmessungen in mm	60 x 60 x 85	94 x 165 x 88	Ø 170 x 350	Ø 180 x 374
Gewichtin in g	370	1000	4600	7000

Für den noch fiktiven Laserscanner LMS Q070B können die Werte des LMS-Q160 etwas abgeschwächt werden. Also: 100 m Reichweite; 50 mm Genauigkeit; 200 Hz eff. Messrate; Abmessung 150x200x100 mm und 1,2 kg

Das gleiche Problem besteht bei der IMU-Einheit. Mit sinkender Größe und Gewicht sinkt auch die Leistung (Genauigkeit der Orientierungswinkelbestimmung, Drift):

Tab. 3.5: Überblick von low-cost IMUs [Applanix (2011)],[Crossbow (2011)],[Honeywell (2011)]

Parameter	Applanix POS AV 410	Crossbow IMU800CA-200	Honeywell HG1700
Genauigkeit Roll- / Nickwinkel in °	0,02	0,1	0,5
Genauigkeit Kurswinkel in °	0,08	0,5	1,5
Drift in °/h	0,5	3	1
Beschl.-rauschen in mg	n. v.	1	1
Aufzeichnungsrate in Hz	200	125	100/600
Abmessungen in mm	128 x 128 x 104	127 x 127 x 72	Ø 94 x 74
Gewicht in g	2100	1600	726

Zu dieser Problematik gibt es diverse internationale Arbeiten, die im Literaturverzeichnis bzw. in der Anlage beigefügt sind!

Hardware

In Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Drohnen muss ein miniaturisiertes ALS-System zusammengestellt werden, dass die höchstmögliche Leistung bei Einhaltung der vorgegebenen Nutzlast bietet. Ein solches System besteht aus:

- Laserscanner
- Positionierungssystem (GPS-Antenne)
- Inertialsystem (IMU)
- Recheneinheit mit Datenaufzeichnung
- Trägerplattform

Obwohl die handelsüblichen Trägerplattformen üblicherweise bereits eine GPS-Antenne zur GPS-Waypoint-Navigation besitzen und auch eine IMU zur Bestimmung der Orientierung und Stabilisierung der Trägerplattform im Raum typischerweise bereits vorhanden sein sollte, entsprechen diese jedoch meistens nicht den Anforderungen die das nun einzusetzende und zu erforschende Airborne Laserscanning an ein solch spezifisches Inertialsystem stellt.

Durch die Vorgabe der maximalen Nutzlast der Trägerplattform wird der Aufbau/die Entwicklung folgende Laserscann-Systeme (Datenblätter der Lasersysteme im Anhang) vorgeschlagen:

1. Hokuyo UTM-30LX
2. Sick LD-MRS400001
3. Riegl LMS Q070B

4. Planung und Ablauf

Der Ablauf des Projektes entsprach weitestgehend den Planungen. Die Projektlaufzeit vom 01.05.2013 - 31.01.2014 wurde eingehalten. Der Kostenplan wurde eingehalten und fast alle bereitgestellten Mittel wurden abgerufen und projektbezogen verwendet, der zahlenmäßige Nachweis des Verwendungsnachweises wurde bereits an den Projektträger Jülich übergeben und von diesem bestätigt und angenommen.

Alle im Projektantrag aufgeworfenen Fragestellungen konnten bearbeitet werden, wobei bei den praktischen Durchführungen bei der angedachten Auswahl der Kleinstlaser schnell ersichtlich wurde, dass hier die theoretischen Anforderungen mit den vorhandenen Techniken und Algorithmen nicht für alle Laser erreicht werden können und dass man sich für eine erfolgreiche Projektbearbeitung intensiv mit nur dem geeignetsten Produkt auseinandersetzen muss. Gleichzeitig sind in dem Bearbeitungszeitraum eine Reihe von neuen Softwareprodukten auf photogrammetrischer Basis auf den Markt gekommen bzw. wurden zu erschwinglichen Preisen im Markt eingeführt, so dass auch die in LEDA-K bearbeitete Verwendung von RGB-Kameras auf UAS mit den neuen Software-Produkten weiter untersucht werden musste, um die Alternative zu den Kleinstlasern vergleichend begutachten zu können.

Aufgrund der starken Witterungsabhängigkeit mussten eine Reihe von Messterminen entweder zusammengefasst oder gesplittet, verschoben oder separat bearbeitet werden, was aber letztendlich trotzdem zur vollständigen Bearbeitung der Projektaufgaben geführt hat.

Aufgabe	Mai 2013	Juni 2013	Juli 2013	August 2013	September 2013	Oktober 2013	November 2013	Dezember 2013	Januar 2014
Testmessung Drohne									
Messung 1 Drohne, ALS 1									
Datenauswertung Test + Messung 1									
Messung 2 Drohne, ALS 2									
Datenauswertung, -vergleich									
Messung 3 Drohne, ALS 3							(Schneemessung)		
Datenauswertung, -vergleich									
Softwareentwicklung									
Softwareüberprüfung									
Datenevaluierung									
Endbericht									
	Erläuterung der Bearbeiter:								
		Milan + StALU MM							
		CIS GmbH + StALU MM							
		Milan + CIS							
		CIS GmbH							
		StALU MM							

5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Hauptziel des Projekts LEDA-K2 im Projektteil „ALS-UAV-Vermessung“ war der Bau eines Prototypes einer UAS (unmanned aircraft system, Hexakopter) mit Kleinstlaser zur Küstengebietserfassung und damit der Nachweis des grundsätzlichen Einsatzes von Drohnen mit kleinen Laserscannern für die Aufgaben des Küsten- und Umweltschutzes, was so vorher noch nicht versucht worden war. Dieses Ziel wurde mit der praxisreifen Entwicklung eines messfähigen Kopters erreicht, der mittlerweile im routinemäßigen Einsatz im Küsten- sowie anderen Landbereichen bei den Firmen CIS und Milan ist und der privaten, gewerblichen und behördlichen Nutzern zum Kauf angeboten wird. Damit konnten die positiven Ergebnisse beim Einsatz von Mobilen Laserscannern (MLS) und fotografischen Aufnahmeverfahren mittels UAV aus dem Projekt LEDA-K fortgeführt werden und zusammen mit den klassischen Aufnahmeverfahren TLS (Terrestrischer Laserscan), Tachymetrie und ALS (Airborne Laserscan) vom Flugzeug/Hubschrauber aus, ist ein Gesamtbild aller möglichen Aufnahmeverfahren im Küstenbereich entstanden und damit ist den Küsten-ländern in Deutschland ein geeignetes Werkzeug für den optimalen Vermessungseinsatz übergeben worden.

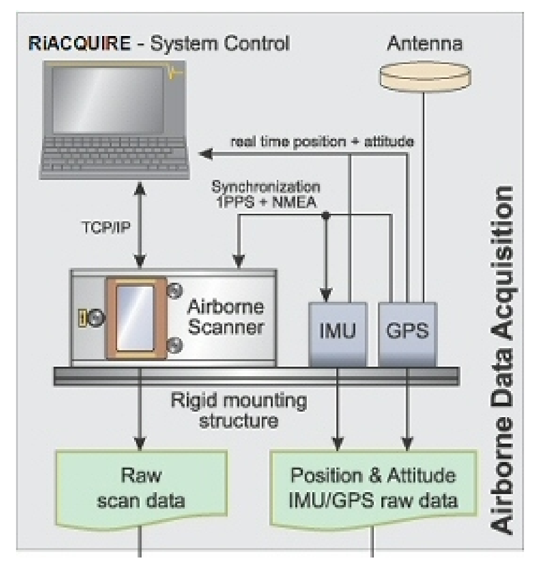
Hauptziel der Softwareentwicklung war die Erstellung einer Spezialsoftware, da die Ergebnisse aus LEDA-K gezeigt hatten, dass die vorhandenen Softwarelösungen keine ausreichend guten Ergebnisse bei der Bildverarbeitung von Luftbildern aus UAV/UAS-Befliegungen im Küstenbereich lieferten. Diese Spezialsoftware ist praxistauglich entwickelt worden und diesem Projektbericht auf CD beigefügt und kann von allen behördlichen und öffentlichen Institutionen nach einer einfachen Registrierung kostenfrei genutzt werden. Diese Software bietet geeignete Lösungen um die speziellen Anforderungen an Genauigkeit, Überlappung, Flughöhe und -geschwindigkeit der UAV/UAS sowie an die besondere Morphologie und Bodenbeschaffenheit im Küstenbereich mit den entwickelten Tools praxisrelevant bearbeiten zu können.

6. Methodik und Ergebnisse Airborne Laserscanning mittels UAS

ALS kam in den 1970er Jahren zum ersten Mal effektiv zum Einsatz. Mittlerweile ist das luftgestützte 3D-Aufnahmeverfahren fester Bestandteil in der Vermessungspraxis. Es kommt zur Anwendung, um hochaufgelöste digitale Geländemodelle (DGM, engl. DTM - digital terrain model) und/oder digitale Oberflächenmodelle (DOM, engl. DSM - digital surface model) zu generieren. DGMs bilden einzig und allein die Geländeoberfläche ohne jegliche Bebauung oder Vegetation ab. Im Gegensatz dazu gibt ein DOM die Geländeoberfläche inklusive aller unbeweglichen Objekte wieder. Im Folgenden werden die gängigen englischen Abkürzungen DTM und DSM im Text verwendet.

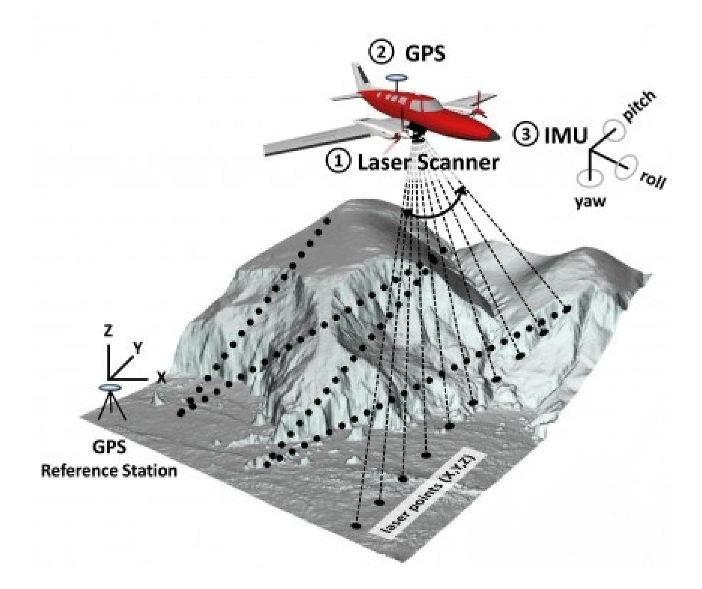
Bestandteile und Funktionsprinzip

Als Plattform für ALS kommen entweder Kleinflugzeuge oder Hubschrauber zum Einsatz. Grundsätzlich besteht ein ALS-System aus zwei Hauptkomponenten. Zum einen aus einer Laserscaneinheit, die die eigentliche Distanzmessung zum Boden durchführt und zum anderen aus einer GPS/IMU-Einheit. Letzteres dient dazu, die genaue Position (GPS) und Ausrichtung (IMU) des Systems zu ermitteln. Die GPS-Antenne ist dabei extern auf dem Oberteil des Fluggerätes angebracht, um die maximale Sicht auf Satelliten zu gewährleisten und um Multipath-Effekte zu eliminieren. Ferner gibt es noch eine Steuerungseinheit, z. B. einen Laptop und eine separate Datenaufzeichnungseinheit. Die Steuerungseinheit steuert nicht nur das gesamte System, sondern ist auch zuständig für die Zeitsynchronisation aller Komponenten.



On-board-Komponenten eines ALS-Systems

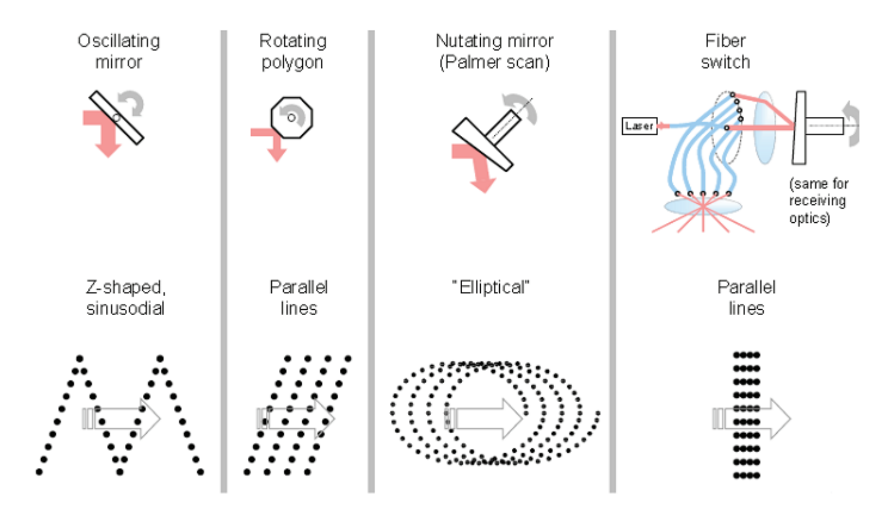
Zusätzlich ist zumeist noch ein Flugmanagementsystem installiert. Dieses gibt Auskunft über den aktuellen Flugstreifen und das gesamte Projekt. Dazu zählen u. a. die Entfernung und Zeit bis zum Ende bzw. Anfang eines Streifens, eine Aufzählung der Streifen die bereits beflogen wurden und welche noch fehlen, sowie Genauigkeitsangaben für Winkel und die Entfernung zur Solllinie. Neben technischen Komponenten ist parallel zum Piloten auch ein sog. Operator mit an Bord. Dieser bedient die Geräte und überwacht das Flugmanagementsystem und gibt dem Piloten Anweisungen, damit die geplanten Flugstreifen eingehalten werden. Das gesamte Funktionsprinzip von ALS mit allen Bestandteilen wird in der folgenden Abbildung veranschaulicht.



Funktionsprinzip des ALS

Der an Bord des Fluggerätes befindliche Laserscanner tastet ununterbrochen die Geländeoberfläche ab, während über die GPS-Einheit die Ermittlung der aktuellen Lage erfolgt. Parallel zeichnet die IMU-Einheit während der Befliegung die Ausrichtung (Orientierung) des ALS-Systems auf. Eine GPS-Referenzstation am Boden zeichnet Korrekturwerte auf, damit die Position des Systems im Nachhinein genauer bestimmt werden kann. Die Steuerungseinheit sorgt dafür, dass alle Werte (GPS, IMU, Lasermesswerte) als Referenzzeit die GPS-Zeit bekommen und dadurch synchrone Zeitstempel tragen. Dies dient in der Nachbearbeitung (post processing) zur korrekten Verknüpfung von GPS-, IMU- und Laserscandaten.

In den für ALS verwendeten Laserscannern werden verschiedene Arten von Scanmechanismen genutzt. Je nach verwendetem Ablenkspiegel und seiner Rotation ergeben sich unterschiedliche Scanmuster am Boden.



Scanmechanismen und daraus resultierende Scanmuster

Bei einem oszillierenden Spiegel bspw. ergeben die Bodenpunkte ein sinusförmiges Muster. Der bei MILAN Geoservice GmbH verwendete Airborne Laserscanner *Riegl Q680i* verwendet zur Ablenkung des Laserstrahls einen rotierenden Polygonspiegel. Dadurch weisen die Punkte am Boden eine gleichmäßige Verteilung auf und die Scanzeilen sind parallel angeordnet. Infolge der Verwendung eines sechskantigen Spiegels (Hexagon) ergibt sich ein maximaler Aufnahmewinkel von 60°.

Laserscanner

Im folgenden Abschnitt werden die Charakteristik und das Messprinzip von Laserscannern im Allgemeinen betrachtet.

Charakteristik

Laserscanner unterscheiden sich, trotz einigen Gemeinsamkeiten, beträchtlich von anderen geodätischen 3D-Aufnahmeverfahren, wie bspw. der Tachymetrie oder der Photogrammetrie. Das Laserscanning ist ein berührungsloses Aufnahmeverfahren, bei dem mehrere tausend Punkte innerhalb einer Sekunde gemessen werden. Die Messrate reicht heutzutage von 1000 bis über eine Million Punkte pro Sekunde. Aufgrund dessen entstehen bei einer Aufnahme große Datenmengen. Zusätzlich werden durch sich überlappende Scans Bereiche am Messobjekt redundant aufgenommen. Dies ist auch nötig, wenn bspw. die Scans nicht über Zielmarken miteinander verknüpft werden. Durch diese massenhafte Aufnahme von Messpunkten verringert sich der zeitliche Aufwand, während sich gleichzeitig der Aufwand in der Nachbearbeitung aufgrund der riesigen generierten Datenmengen erhöht. Zudem werden zu jedem Messpunkt nicht nur seine 3D-Koordinate gespeichert, sondern auch der Intensitätswert, mit dem der reflektierte Strahl auf den Empfänger trifft.

Ist auf dem Scanner eine Digitalkamera montiert, kann zusätzlich jedem Messpunkt ein Grauwert zugewiesen werden. Ferner ist es nicht zwingend notwendig, dass der Laserscanner mit seiner z-Achse parallel zur Zenitrichtung ausgerichtet ist. Somit können auch Kamera- und Hybridscanner Oberflächen in Zenitrichtung aufnehmen. Ein weiterer entscheidender Vorteil von Laserscanning ist die Unabhängigkeit vom Tageslicht. Es ergibt sich keine Notwendigkeit am Tage zu messen, da weder konkrete Punkte mit einer Optik angezielt werden müssen noch der Laserstrahl auf Umgebungslicht angewiesen ist. Das nicht Anzielen von konkreten Punkten ist aber zugleich auch der größte Nachteil des Laserscanning. So können beispielsweise Ecken oder Kanten nicht direkt ermittelt werden. Dafür erfolgt zunächst die Ableitung von Ebenen aus der Punktwolke heraus und anschließend werden diese miteinander verschnitten.

Messprinzip

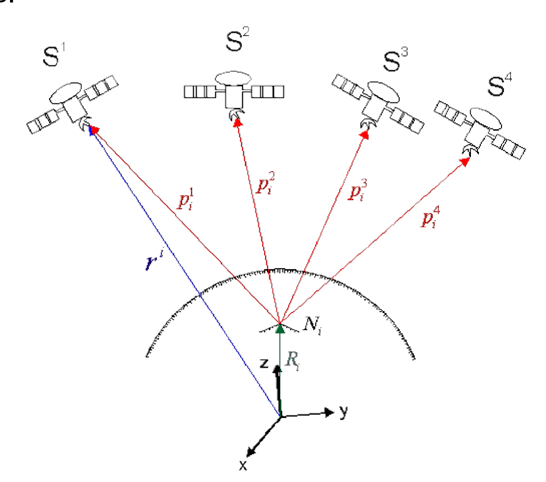
Jeder Laserscanner verfügt über eine Sendeeinheit die meist zugleich auch als Empfangseinheit fungiert. Die Sendeeinheit strahlt, je nach Messprinzip, einen Laserimpuls oder eine Trägerwelle aus. Als nächstes trifft dieses Signal auf 1 oder 2 Rotationsspiegel, die es in eine bestimmte Richtung lenken. Die Drehachsen der Spiegel sind meist identisch mit einer der drei Koordinatenachsen des Scanners. So kann bspw. ein Spiegel den Strahl in x-Richtung verändern und der Zweite in z-Richtung. Allerdings können die Achsen schief im Raum liegen, da der Scanner nicht zwangsläufig horizontal aufgestellt sein muss. Bei einem Panoramascanner kommt kein Spiegel zum Einsatz. Bei ihm wird der Strahl in Richtung eines schwenkbaren Fernrohrs ausgesandt, welches auf einem Oberteil angebracht ist. Das Oberteil ist zumeist in der xy-Ebene des Scanners schwenkbar. Die Ausrichtung der Spiegel bzw. des Fernrohrs und des Oberteils wird über die Steuereinheit des Scanners geregelt. Wenn der ausgesendete Strahl auf eine Oberfläche trifft, wird er mit unterschiedlicher Intensität zum Scanner zurückgestrahlt. Die Spiegel lenken den eintreffenden Strahl wieder zurück zur Sendeeinheit, die jetzt als Empfangseinheit dient. Dort wird über die Laufzeit bzw. die Phasenverschiebung die zurückgelegte Distanz errechnet. Die ermittelte Distanz und der Intensitätswert der Messung werden an die Recheneinheit des Scanners übermittelt. Die Recheneinheit ermittelt aus der Distanz und den Richtungen der Drehspiegel, die sie über die Steuerungseinheit mitgeteilt bekommt, die xyz-Koordinaten des Zielpunktes. Die Koordinate und der Intensitätswert werden im Massenspeicher abgelegt.

GPS / GNSS Positionsbestimmung

Alle satellitengestützten Positionierungssysteme werden übergeordnet als Global Navigation Satellite System (GNSS) bezeichnet. Ein GNSS besteht im Wesentlichen aus einem Weltraumsegment (Satelliten), einem Kontrollsegment (Bodenkontrollstationen) und einem Nutzersegment (GNSS-Empfänger). Die beiden einzigen im operativen Einsatz befindlichen Systeme sind das amerikanische Global Positioning System (GPS) und das russische Globalnaya Navigationsnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS). Die Satelliten kreisen in mehreren festen Bahnen um die Erde und werden dabei über die Bodenstationen überwacht und gesteuert. Bei GPS bewegen sich die Satelliten in 6 Bahnen und bei GLONASS in 3 Bahnen um die Erde. Beide Systeme haben jeweils nominell 24 Satelliten im aktiven Dienst, meist sind es jedoch mehr.

Funktionsprinzip

Alle Satellitensysteme arbeiten nach demselben Grundprinzip. Jeder aktive Satellit sendet ständig codierte Signale mit Navigationsnachrichten in Richtung Erde aus. Über die Zeit, die das Signal vom Satelliten zum Empfänger braucht, wird mithilfe der Ausbreitungs-geschwindigkeit in der Atmosphäre die zurückgelegte Strecke (sog. Pseudoranges) berechnet. Um eine Position auf der Erde absolut zu bestimmen, sind Strecken zu mindestens vier Satelliten nötig, von denen jeweils die absolute Position bekannt ist. Es sind Messungen zu mindestens vier Satelliten nötig, da neben den drei unbekannten Koordinaten des Empfängers (X, Y, Z) auch der Empfängeruhrfehler ermittelt werden muss. Durch die Positionsbestimmung ausschließlich aus Strecken erfolgt die Berechnung anhand eines räumlichen Bogenschnitts.



Positionsbestimmung mit GNSS

Die weltweit stationierten Bodenstationen des GPS definieren das globale Referenzsystem World Geodetic System 1984 (WGS84).
Ausgesendet werden die Signale auf zwei Frequenzen (L1 + L2), welche einen hochgenauen Zeitstempel tragen, der durch eine Atomuhr erzeugt wurde. Auf die Frequenzen werden neben den Navigationsnachrichten auch Codes aufmoduliert, mithilfe derer die Berechnung der Zeitunterschiede durchgeführt wird. Auf die L1-Frequenz wird der sog. C/A-Code (Clear Access) und P-Code (Precise) und auf L2 ausschließlich der P-Code aufmoduliert. Die Berechnung der Zeitdifferenzen erfolgt mithilfe der Codemessungen und/oder der Phasenmessungen. Dabei können bei der Verwendung von Codemessungen Metergenauigkeiten und mit Phasenmessungen Zentimeter- bis Millimetergenauigkeiten erreicht werden.

Fehlereinflüsse

Die Messungen mit GPS-Empfängern unterliegen verschiedenen Fehlereinflüssen, von denen an dieser Stelle nur diejenigen kurz beschrieben werden, die bei den vorherrschenden Messbedingungen im Rahmen des Projektes eine Rolle spielen.

Einen großen Einfluss auf die Qualität und damit der Genauigkeit des GPS-Signals ist der zurückgelegte Weg durch die Erdatmosphäre. Die Erdatmosphäre teilt sich grob mit steigender Höhe auf in Erdoberfläche, Troposphäre (ca. in 10 km Höhe), Stratosphäre (bis 50 km), Mesosphäre (bis 80 km), Thermosphäre (bis 500 km) und die Exosphäre (über 500 km bis ca. 1000 km). Der größte Einfluss auf die Signale hat die Troposphäre, gefolgt von der Ionosphäre. In der Ionosphäre kommt es zu einer Refraktion der Satellitensignale (ionosphärische Refraktion). Dabei spielen zwei Faktoren eine entscheidende Rolle. Zum einen weicht die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ab und zum anderen ist der Brechungsindex entlang des Signalweges verschieden, wodurch das Signal gebeugt wird. Letzteres kann aufgrund seiner geringen Auswirkung vernachlässigt werden. Der Einfluss aufgrund des Unterschieds zur Lichtgeschwindigkeit kann entweder über die Verwendung von Zweifrequenz-Messungen oder über relative Positionierung (DGPS) verringert werden. Auch in der Troposphäre kommt es aufgrund von Refraktion der Satellitensignale zu Fehlereinflüssen. Zur Korrektion der Messungen werden Standardatmosphärenparameter und -modelle verwendet und sog. Mapping Funktionen. Das Anwenden von relativer Positionierung verringert diese Fehlereinflüsse nochmals.

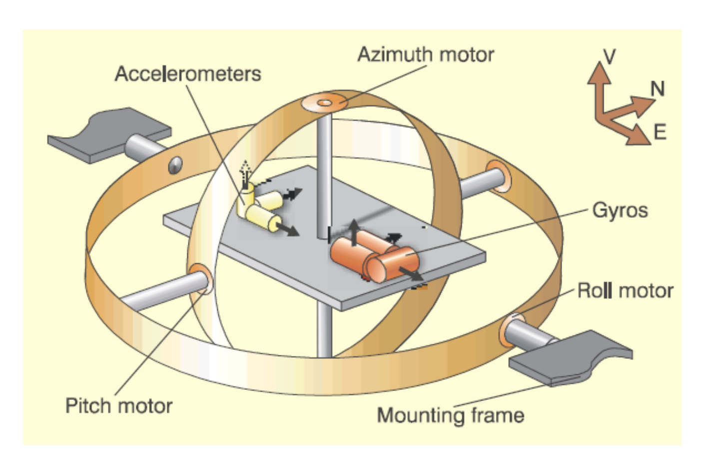
Weitere Fehlereinflüsse sind die Mehrwegausbreitung und Beugung der Satellitensignale. Beide Einflüsse können ignoriert werden, da die Flughöhe der Drohnen mindestens 50 m beträgt und der Einsatz vorwiegend an Küstenregionen ohne hohe Bebauung stattfinden soll.

Änderungen in den Satellitenbahnen werden ständig durch die Navigationsnachrichten der Satelliten übermittelt. Damit sind die Schwankungen der Satellitenumlaufbahnen aufgrund des Einflusses der Sonne und des Mondes vernachlässigbar.

Bleibt zuletzt noch die Satellitengeometrie als Indikator der Qualität einer GPS-Messung zu nennen. Die Satelliten, die für eine Messung genutzt werden, spannen mit dem Empfänger einen Volumenkörper auf. Je größer das Volumen dieses Körpers ist, desto kleiner ist der sog. DOP-Wert (Dilution of Precision) der Messung. Die Qualität wird demnach durch Abschattungen und ungünstige Satellitenkonstellationen verringert. Da sich die Drohnen bei der Aufnahme generell in der Luft befinden und der Einsatz in Küstengebieten stattfindet, ist mit keinen schlechten DOP-Werten zu rechnen.

Inertialmesssystem

Ein Inertialmesssystem (inertial measuring unit - IMU) dient zur Ermittlung der dreidimensionalen Orientierung eines Systems. In Kopplung mit GPS finden sie neben dem flugzeuggestützten Laserscanning auch in anderen Bereichen der Vermessung Anwendung. IMUs funktionieren unabhängig von externen Daten und operieren daher völlig autonom. Sie bestehen im Wesentlichen aus drei Beschleunigungssensoren und drei kardanisch-aufgehängten Kreiseln. Sowohl jeder der drei Beschleunigungssensoren als auch der drei Kreisel sind an eine der drei orthogonalen Achsen eines 3D-Koordinatensystems angeordnet. Eine Achse ist in Nord-Süd-, die Zweite in Ost-West-Richtung ausgerichtet und die Dritte vertikal zu den beiden anderen. Damit ist die Ausrichtung der IMU definiert. Die drei Beschleunigungssensoren messen die Beschleunigungen entlang der jeweiligen drei orthogonalen Achsen. Integriert man diese Beschleunigungen, so erhält man die Geschwindigkeiten entlang der Achsen. Integriert man ein weiteres Mal, erhält man Positionsdifferenzen. Ist der Ursprung der Bewegung bekannt, können daraus absolute Koordinaten der neuen Position aus der bekannten Startposition errechnet werden.



kardanisch-aufgehängtes Inertialsystem

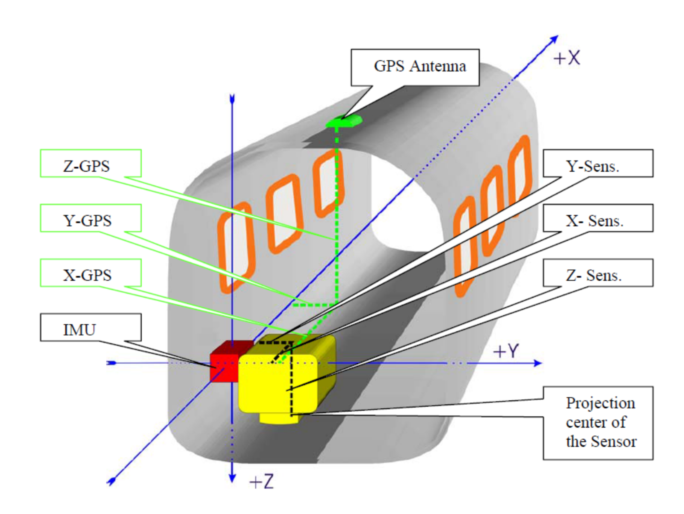
Damit die Beschleunigungssensoren ihre absolute Ausrichtung, bei einer Bewegung des Systems, aufrechterhalten, sind sie an einem Satz von drei kardanischen Aufhängungen befestigt. Diese werden über jeweils einen Kreisel in ihrer Richtung stabilisiert. Kreisel funktionieren nur in eine Richtung und damit nur entlang einer Achse. Jeder der drei Kreisel ist über einen Ausgang mit einem Servomotor verbunden, der die kardanische Aufhängung in ihrer ursprünglichen Ausrichtung hält. Neben einem Servomotor hat jede kardanische Aufhängung am gegenüberliegenden Ende eine elektromagnetische Winkelmesseinrichtung. Jede Winkelmesseinrichtung ist für einen anderen der drei Orientierungswinkel zuständig. Die innerste Kardanaufhängung misst Azimut-Winkel, der in der Navigation auch als Heading oder Yaw-Winkel (dt. Gierwinkel) bezeichnet wird. Auf der mittleren Aufhängung wird der Pitch-Winkel (dt. Nickwinkel) gemessen. Auf der äußersten Kardanaufhängung erfolgt die Ermittlung des Roll-Winkels.

In der Vergangenheit bestanden IMUs mehr aus mechanischen Bauteilen, die aufwendiger und teurer waren. Seit dem Zeitpunkt, ab dem leistungsfähigere Rechner zur Verfügung standen, werden fast ausschließlich nur noch sog. Strapdown-Systeme verwendet. Bei diesen Systemen sind die Beschleunigungs- und Winkelsensoren fest auf einer Platte montiert, die wiederum fest mit dem Trägersystem gekoppelt ist. Der Verzicht von mechanischen Elementen führte zu einer weiten Verbreitung von IMUs. Diese werden heutzutage in vielen Bereichen mit einem GNSS-System gekoppelt, durch das ständig genaue Positionsinformationen an die IMU gesendet werden.

Abstimmung der Komponenten

Zunächst einmal müssen die xyz-Vektoren zwischen den Hauptkomponenten (sog. leverarm, dt. Hebelarm) bestimmt werden. Üblicherweise erfolgt dies in der folgenden Anordnung:

- Vom GPS-Antennenzentrum zum Ursprung der IMU-Einheit (grün)
- Vom Ursprung der Laserscanbaugruppe zur IMU-Einheit (schwarz)



Leverarms bei einem ALS-System

Die Bestimmung der Vektoren erfolgt entweder durch Tachymetrie oder einfach per Lot, Wasserwaage und Gliedermaßstab. Nachdem die Vektoren bestimmt sind, kann das Koordinatensystem des Messsystems als Ursprung für alle folgenden Messungen verwendet werden. Vor jeder Messkampagne werden zudem Kalibrierflüge durchgeführt, um Winkelfehler zwischen der IMU-Einheit und der Scannerbaugruppe aufzudecken.

Für die genaue Rückverfolgung der Flugbahn (Trajektorie) sind exakte Positions- sowie Winkelangaben (Roll, Pitch und Yaw) der IMU-Einheit nötig. Typischerweise leiden IMU-Einheiten unter systematischem Driften in allen drei Winkeln, die bei längerer Zeit zu Genauigkeitsverlusten führen. Die Drift in der Position kann mittels genauer Positionsangaben anhand der zuverlässigeren GPS-Messung korrigiert werden. Die Flugrouten werden linear geplant, um Lücken in der Datenaufnahme zu vermeiden. Dabei treten nur minimale Bewegungen in den drei Rotationswinkeln auf. Die Bewegungen wirken die Gefahr, dass aufgrund der IMU-Drift falsche Orientierungswinkel bestimmt werden. Denn bei IMU-Einheiten kommt es bei dauerhaft kleinen Orientierungswinkeln zu einer sog. „Müdigkeit“ der Inertialkreisel. Aufgrund dessen erfolgt ca. aller 20 Min. eine Richtungsänderung des Fluggerätes, was zur Folge hat, das Fluglinien in ihrer maximalen Länge von der Fluggeschwindigkeit begrenzt sind.

Messcharakteristik

Aussagen über die Charakteristik einer Laserscanmessung können anhand von vier Kriterien getroffen werden. Dazu zählen die Streifenbreite, die Laserpunktgröße auf dem aufzunehmenden Objekt (sog. Footprint, dt. Fußabdruck), die Messfrequenz des Laserscanners und die erreichte Punktdichte am Boden.

Die Streifenbreite einer Messung wird in Metern angegeben und hängt von dem Aufnahmewinkel des Scanners und der Flughöhe ab. Je größer der Aufnahmewinkel und die Flughöhe sind, desto größer ist auch die Streifenbreite. Jedoch haben diese beiden Faktoren wiederum Einfluss auf die Punktdichte und den Footprint einer Aufnahme. Die Punktdichte wird üblicherweise in Punkten pro m² angegeben und ist umso höher, je geringer die Flughöhe sowie –geschwindigkeit und je höher die Lasermessfrequenz des Scanners sind. Ein Aufnahmegebiet kann umso genauer beschrieben werden, desto höher die Punktdichte ist. Liegen die einzelnen Punkte weit auseinander, können Details, wie bspw. Ecken oder Kanten, nur grob widergegeben werden. Der sog. Footprint gibt die Größe des Laserimpulses auf der aufzunehmenden Oberfläche an. Die Angabe des Durchmessers eines Footprint wird je nach Dimension in Zenti-, Dezi- oder Metern angeführt und ist neben dem verwendeten Scannersystem auch abhängig von der Flughöhe. Der Footprint eines Scanners wird meist als Durchmesser auf eine bestimmte Entfernung beziffert und nimmt mit zunehmender Entfernung bzw. Flughöhe zu. Je größer ein Footprint ist, desto mehr Oberfläche hat Einfluss auf das reflektierte Signal und damit auf die gemessene Distanz. Es kommt zu Mischsignalen. Damit einher geht die Genauigkeit einer 3D-Punktmessung. Die Messwiederholungsrate ist ebenfalls von Scanner zu Scanner verschieden und wird in Anzahl der Messungen pro Sekunde (Hertz) beschrieben. Durch eine hohe Messrate kann mit zunehmender Flughöhe ein größeres Gebiet pro Flugstreifen aufgenommen werden, ohne das die Punktdichte am Boden reduziert wird. Anders betrachtet kann in gleichbleibender Höhe schneller geflogen werden, ohne dass die Punktdichte abnimmt, wodurch wiederum Flugstunden eingespart werden.

Flugplanung

Zur Erstellung einer Flugplanung wird meist vom Hersteller des Laserscanners eine entsprechende Flugplanungssoftware mitgeliefert. Ausgangspunkt zur Erstellung der Flugroute ist die vom Auftraggeber vorgegebene Punktdichte in Punkte pro Quadratmeter. Zusammen mit dem Aufnahmewinkel des verwendeten Scanners hängen davon die operative Fluggeschwindigkeit sowie Flughöhe ab.

Um die Befliegung ökonomisch zu planen, sollte der im Rahmen der Projektanforderung größtmögliche Aufnahmewinkel gewählt werden. Nach der Festlegung der Streifenbreite werden die einzelnen Flugstreifen parallel nebeneinander mit einer Überlappung angelegt, damit das gesamte Projektgebiet abgedeckt ist. Die Überlappung dient dazu, Lücken im Aufnahmegebiet zu vermeiden, die durch kleinere Kursabweichungen und Schwankungen des Fluggerätes entstehen können. Kann die geforderte Punktdichte trotz aller Anpassungen nicht eingehalten werden, wird die Überlappung der Streifen soweit erhöht, dass das gesamte Gebiet doppelt aufgenommen wird. Unter Umständen erfolgt eine Teilung der Längsstreifen aufgrund der IMU-Driftgrenzen. Je nach individuellen Vorgaben des Auftraggebers werden zusätzlich am Anfang und am Ende der Flugstreifen ggf. Querstreifen beflogen. Dies dient dazu, dass gesamte System zu stabilisieren und gleichzeitig eine Qualitätskontrolle durchzuführen. In die Flugplanung können auch bereits vorhandene DTMs des Gebiets mit einbezogen werden, um Höhenunterschiede im Gelände bei der Planung zu berücksichtigen. Nach der Erstellung des Flugplanes, wird dieser vor der Befliegung in das Flugmanagementsystem eingelesen.

Datenverarbeitung

Nach der Befliegung liegen nun Navigationsdatensätze, Distanzen und Korrekturwerte der Bodenreferenzstation vor. In diesem Abschnitt wird behandelt, welche Schritte notwendig sind, um letztendlich eine angepasste 3D-Punktwolke des gesamten Aufnahmegebietes zu erhalten.

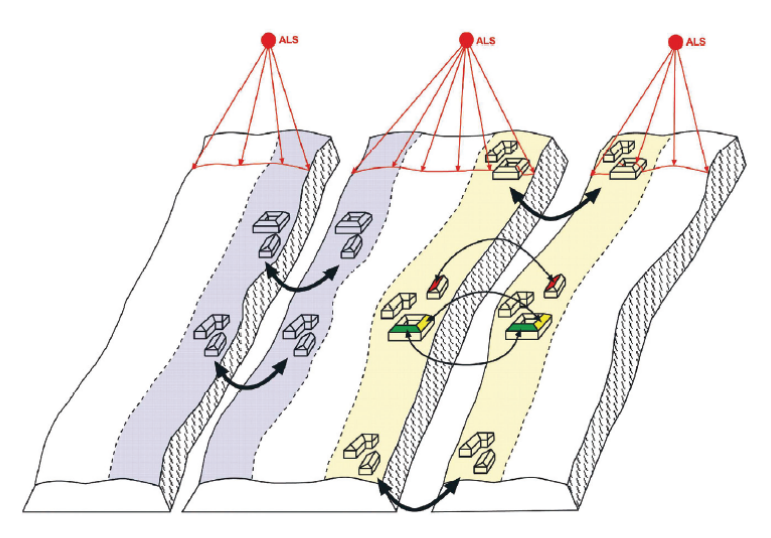
Ermittlung der Trajektorie und 3D-Koordinatenberechnung

Die Berechnung der genauen Flug-Trajektorie erfolgt im Nachgang (post processing) an die Befliegung. Da die Positions-, Orientierungs-, Distanzdaten und die Korrekturwerte der Referenzstation den hochgenauen GPS-Zeitstempel tragen, ist eine Zuordnung der korrekten Daten möglich. Dabei werden zuerst die GPS-Positionen anhand der Korrekturwerte der Referenzstation verbessert. Anschließend liegen genaue Positionswerte für die geflogene Route vor. Anhand der genauen GPS-Positionen werden die IMU-Werte (aufgrund der Drift) korrigiert. Danach erfolgt die Interpolation zwischen den Positionen mit Hilfe der höher frequentierten IMU-Werte. Durch die Kombination beider Messverfahren erhält man die genaue Flugroute, die sowohl in ihrer Lage als auch ihrer Höhe verbessert wurde. Des Weiteren werden systematische Fehler in der Orientierung (z. B. Drift) verringert und kurzzeitige Effekte in den GPS-Signalen abgeschwächt. Damit steht eine Trajektorie bereit, deren Verlauf hochgenau und hochfrequent beschrieben wird

Für die Berechnung der 3D-Punkte benötigt man nun die beiden vorher bestimmten 3D-Vektoren zwischen GPS-Antennenzentrum – IMU-Einheit – Ursprung der Scannerbaugruppe. Durch die feste Anbringung der IMU-Einheit und der Scannerbaugruppe am Fluggerät bleiben die Vektoren zwischen den Komponenten die gesamte Zeit konstant. Des Weiteren befinden sich alle Baugruppen in unterschiedlichen Koordinatensystemen. Der Laserscanner ist mit seiner x-Achse in Flugrichtung, mit der y-Achse horizontal senkrecht zur x-Achse nach rechts ausgerichtet und die z-Achse zeigt rechtwinklig zu den beiden Vorherigen nach unten. Die Orientierung der IMU wird über die drei Rotationswinkel Pitch, Roll, und Yaw beschrieben und befinden sich nahezu im Horizontkoordinatensystem. Baubedingt weichen diese Achsen leicht vom Horizontsystem ab. Die Bestimmung dieser Abweichungen vollzieht sich im darauffolgenden Schritt, der Kalibrierung. Mithilfe von Transformationsmatrizen werden die gemessenen Distanzen in das Horizontsystem der IMU-Einheit überführt. Im Anschluss daran erfolgt die Überführung und Berechnung der 3D-Punktkoordinate in das Koordinatensystem WGS84, in dem sich auch die GPS-Positionen befinden. Die Berechnung der 3D-Punkte findet für jeden gemessenen Flugstreifen separat statt. Dieser umfangreiche Rechenvorgang benötigt je nach Größe des Projektes bis zu mehrere Tage.

Kalibrierung

Durch die Kalibrierung der erzeugten Punktwolkenstreifen werden einige systematische Fehlereinflüsse iterativ minimiert. Darunter zählen unter anderem die Boresight Winkel (dt. Achsverschwenkung), die die Differenz zwischen der IMU- und Scannerausrichtung beschreiben. Die Annäherung an diese systematischen Orientierungsfehler erfolgt durch eine Ausgleichung, nach dem ‚Verfahren der kleinsten Quadrate', für jeden Streifen über ausgewählte ebene Flächen. Diese müssen sich dabei im Überlappungsbereich mit einem anderen Streifen befinden, um eine Ausgleichung zu ermöglichen. Straßen oder Häuserdächer stellen für diese Berechnung geeignete Flächen dar. Sie weisen einen hohen Kontrast gegenüber ihrer Umgebung auf und können dadurch eindeutiger aus den Laserdaten herausgefiltert werden.



Prinzip der Streifenblockausgleichung

Nach der Ausgleichung erfolgt das erneute Rechnen der Daten zu 3D-Koordinaten mit den verbesserten Orientierungswinkeln. Aus den daraus entstehenden neuen Streifen werden über die ebenen Flächen erneut die Orientierungsfehler ausgeglichen. Das ganze wiederholt sich so oft, bis die Ausgleichung keine signifikanten Änderungen hervorbringt.

Spuranpassung

Durch den vorherigen Schritt sind die einzelnen Streifen zwar schon sehr gut zueinander ausgerichtet, dennoch besteht Anpassungsbedarf, um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen. Während in der Kalibrierung systematische Fehler ausgeglichen wurden, erfolgt bei der Spuranpassung das Ausrichten aller Streifen relativ zueinander. Diese Unterschiede, bspw. in der Höhe und/oder im Rollwinkel, resultieren aus zufälligen Messabweichungen. Der Anpassungsvorgang ähnelt allerdings sehr dem des Kalibrierens. Auch hier erfolgt durch geeignete ebene Flächen in den Überlappungsbereichen eine Bündelblockausgleichung über alle Spuren hinweg. Anschließend liegen als Ergebnis zusammenhängende Punktwolkenstreifen vor, ohne einen signifikanten Höhenversatz zueinander.

Feingeoreferenzierung anhand von Referenzobjekten

Mit einem Vergleich von Lage und Höhe zu Referenzobjekten, die über das gesamte Projektgebiet verteilt sind, erfolgt eine Anpassung des gesamten Streifenverbandes und somit des ganzen Projektes. Als Lagereferenzen werden bspw. Gebäudeumrisse verwendet. Anschließend werden gemessene Punkte auf horizontalen Flächen (z. B. Parkplätze) genutzt, um das Projekt in der Höhe anzupassen.

Die Referenzdaten stammen entweder vom Auftraggeber, von/m Vorgängerprojekt/-en oder wurden eigenständig per GPS und/oder Tachymetrie dreidimensional vor Ort bestimmt. Zuerst werden Unterschiede in der Lage ermittelt. Nach zuvor erfolgreicher Berechnung und Kalibrierung, sollten sich bei den Referenzobjekten über das gesamte Gebiet ähnliche Offsets in x- und y-Richtung ergeben. Es ist wichtig, dass zuerst die Anpassung in der Lage erfolgt und anschließend die Anpassung in der Höhe. Denn allein aufgrund von Lageabweichungen ergeben sich Höhenunterschiede zu den Referenzen. Nach der Lageanpassung aller 3D-Punkte werden die Höhendiskrepanzen zu den Referenzen festgestellt. Im Gegensatz zur Lage müssen die errechneten Höhendifferenzen über das Projektgebiet nicht einheitlich sein. Bei einer Verkippung bspw. kann es auf einer Seite zu einem positiven Offset und auf der anderen Seite zu einem Negativen kommen. Ergeben sich in etwa gleich große Differenzen, so wird ein einheitlicher Offset angebracht. Bei ungleichen Differenzen sollte eine Systematik (z. B. Verkippung) zu erkennen sein. In dem Fall wird kein einheitlicher Höhen-Offset angebracht, sondern ein Offset in Abhängigkeit von der Lage. Nach der Georeferenzierung weisen die ALS-Daten eine absolute Lagegenauigkeit von besser gleich 20 cm und absolute Höhengenauigkeit von besser gleich 10 cm auf. Die erreichte Genauigkeit hängt von den Gegebenheiten des Aufnahmegebietes und der verwendeten Hardware ab.

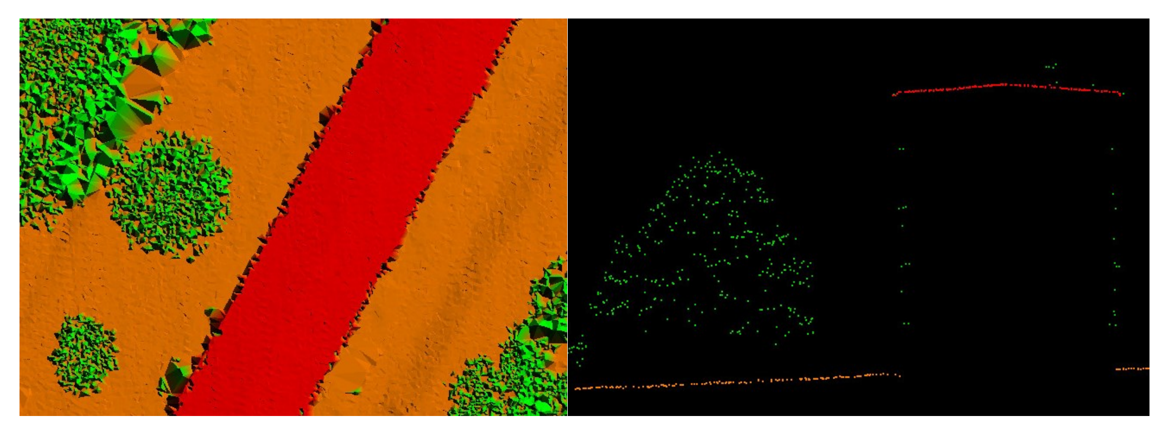
Weiterverarbeitung

Nach dem vorherigen Schritt liegt nun ein georeferenziertes Projekt vor, in dem die 3D-Punkte im weiteren Verlauf weiterverarbeitet werden. Eine erste Bearbeitung besteht meistens darin, die Punkte verschiedenen Klassen zuzuordnen. Die Unterteilung erfolgt dabei in grobe Klassen, die im Allgemeinen wie folgt aufgebaut sind:

- Unclassified
- Ground
- Non-ground-low
- Non-ground-high
- Building
- Low-Points
- Intermediate Vegetation
- Error

Die Einteilung kann je nach Auftraggeber variieren und beinhaltet dann mehr bzw. zum Teil andere Klassen. Die Klassifizierung findet zunächst automatisch mithilfe von Klassifizierungsfunktionen statt, die auf den jeweiligen Geländetyp angepasst sind.

Im Anschluss daran erfolgt eine manuelle Klassifizierung in der fehlerhafte Klassenzuordnungen manuell korrigiert werden. Die folgende Abbildung zeigt den Ausschnitt aus einem klassifizierten Datensatz (rot = building, braun = ground, grün = non-ground-low und -high).



Klassifizierte Punktwolke in der Draufsicht (links) und einer Seitenansicht (rechts)

Nachdem die Klassifizierung samt Qualitätskontrolle durchgeführt wurde, können Endprodukte aus den 3D-Punktdaten abgeleitet werden. Neben DSMs und DTMs können die Daten außerdem genutzt werden, um Gebäude für 3D Stadtmodelle zu vektorisieren, Wälder und Küsten zu kartieren oder Hochspannungsleitungen aufzunehmen. Die Übergabe der Endprodukte erfolgt in mit dem Auftraggeber vorher festgelegten Ausgabeformaten.

Forschungsprojekt LEDA-K2

Ziele

Als Nachfolger von LEDA-K setzen die Ziele von LEDA-K2 an denen des Vorgängerprojektes an. Schwerpunkte dieses Projektes waren die Erforschung und Erprobung eines ALS mit Drohne sowie teilautomatisierte Auswerteverfahren. Folgende Ziele waren für das Projekt definiert: Die Entwicklung inklusive Erprobung von Kleinlasern auf einer Drohnenplattform, sowie die Weiterentwicklung der Drohnensteuerung, um diese besser auf die Küstenbefliegung abzustimmen. Ferner sollten die gewonnenen Luftbilder mit alternativer Software bearbeitet und die zeitliche Minimierung der Nachbearbeitung sollte durch teilautomatisierte Bearbeitungsverfahren ermöglicht werden. Das Projekt LEDA-K2 war dabei eine Kooperation des StALUMM, der CiS GmbH sowie der MILAN Geoservice GmbH.

ALS mit Drohne

Das geplante ALS-Drohnensystem sollte aus den gleichen Komponenten wie ein herkömmliches ALS-System bestehen. Dazu zählen ein Miniaturlaserscanner, Positionierungssystem (GPS-Antenne), IMU, Recheneinheit inklusive Datenaufzeichnung und der Drohne als Trägerplattform selbst. In dem Projekt sollte zunächst die Kopplung der einzelnen Baugruppen hergestellt, sowie, wenn möglich, mehrere verschiedene Komponenten getestet werden. Weiter galt es, die Kommunikation der einzelnen Elemente untereinander zu ermöglichen und eine geeignete Recheneinheit für diese Aufgabe zu finden. Diese sollte sowohl als Verbindungsstelle als auch zur Datenaufzeichnung dienen. Auch die zeitliche Synchronisation der aufgezeichneten Messwerte (Positionsdaten, Orientierungs- und Bewegungsdaten, Distanzmessungen) musste mithilfe der Recheneinheit gelöst werden. Weiterhin sollten die aus den einzelnen Flugrouten erhaltenen gescannten Spuren durch geeignete Anpassungsalgorithmen miteinander verknüpft werden.

Teilautomatisierte Auswerteverfahren

Neben der Entwicklung eines neuen Aufnahmesystems sollte in LEDA-K2 auch die computergestützte Auswertung der Bilddaten weiter optimiert werden. Dabei sollte ein möglichst großer Teil des Auswerteablaufs automatisiert bzw. teilautomatisiert ablaufen. Eine Realisierung dieses Ziels ergibt neue Einsatzmöglichkeiten für den Küstenschutz. Dabei könnte bspw. ein DOM des Küstenstreifens erstellt und weiterhin auch gepflegt werden. Dieses Vorgehen ermöglicht zeitliche Veränderungen abzuleiten und Prognosen zu erstellen, aus denen wiederum Maßnahmen dagegen hervorgehen können.

Ziel sollte demnach sein, Hardware und Software speziell für das Küstenmonitoring zu kombinieren und dabei einen hohen Automatisierungsgrad zu erreichen. Die bisherigen verwendeten Programme erzielten nicht die erhofften Ergebnisse. Dazu müssten die Datenauswertungsverfahren weiterentwickelt und die Auswerte- und Modellierungsprozesse beschleunigt werden. Durch die Verwendung neuer Software sollten die errechneten Daten genauer, zuverlässiger und plausibler werden. Zusätzlich dazu sollte überprüft werden, inwiefern schon vorhandene Geländedaten mit in der Flugplanung Beachtung finden können, um zukünftige Befliegungen zu optimieren.

Bestandteile der LEDA-K2 Drohne

Das folgende Kapitel erläutert die Komponenten der LEDA-K2 Drohne.

Flugplattform MikroKopter Basisset Hexa XL

Als Flugplattform kommt das Hexakopter-Modell Hexa XL der Firma MikroKopter zur Anwendung.



MikroKopter Basisset Hexa XL

Wie der Name schon impliziert, erfolgt der Auftrieb der Drohne über sechs Rotoren (weitere Spezifikationen kann man der folgenden Tabelle entnehmen). Es handelt sich um ein Set zum Bau der Drohne. Der Zusammenbau und die Anbringung aller Komponenten erfolgte, genau wie bei der LEDA-K Drohne, durch die CiS GmbH Rostock.

Technische Daten MikroKopter Basisset Hexa XL

Gewicht ohne Akku [g]	1600
Maximale Nutzlast [g]	1500
Durchmesser [mm]	730
Höhe [mm]	410
Flugzeit (mit 14,8V 6600 mAh LiPo-Akku) [Min.]	13-28 (variiert je nach Nutzlast)

GPS-Chipset UBX-G5000/G0010

Die Chipsätze UBX-G5000 und G0010 der schweizerischen Firma U-Blox sind ein Positionierungssystem und durch ihre geringe Größe und geringes Gewicht geeignet für Anwendungen wie die Positionierung von unbemannten Fluggeräten, in denen die Größe und das Gewicht eine zentrale Rolle spielen. Sie unterstützen die L1-Frequenzen mit dem C/A-Code der GPS- und auch die L1-Frequenzen der zukünftigen Galileo-Satelliten.

Technische Daten UBX-G5000/G0010

Maximale Updaterate [Hz]	< 4 ROM / 2 Flash
Genauigkeit [m]	2,5
Maximale Geschwindigkeit [m/Sek.]	50
Maximale Einsatzhöhe [m]	50
Messbedingungen [°C]	-40 ~ +85
Abmessungen [mm]	UBX-G5000: 9 x 9 x 0.91 UBX-G0010: 4 x 4 x 0.85

Durch die hohe Unempfindlichkeit gegenüber Störungen erfolgt eine Positionierung auch bei schwierigen Satelliten-Sichtverhältnissen, wie bspw. in Häuserschluchten, und in Gebieten mit schwacher Signalabdeckung.

Autopilot-Einheit Krooz inklusive IMU-Sensor MPU-6000/6050

Bei dem Autopiloten Board „Krooz“ handelt es sich um ein Board, welches speziell für die Steuerung von Fluggeräten entworfen wurde. Das Board kann mit verschiedensten Sensoren, Modulen und Einheiten bestückt werden und ist durch seine geringe Größe ideal für UAV-Systeme.
Unter anderem wurde das Krooz-Board mit einem MPU-6000/6050-Modul ausgestattet, welcher zur Gewinnung der Orientierungsdaten dient. Das Modul enthält eine 3-achsige kardanische Kreiselaufhängung und einen 3-Achsen Beschleunigungssensor, die auf ein und demselben Siliziumchip montiert sind. Zusätzlich befindet sich noch ein digit. Bewegungsprozessor an Bord.

Recheneinheit PandaBoard ES

Das PandaBoard ES ist die Plattform für die LEDA-K2 Drohne, in der alle Komponenten zusammenlaufen. Das Board besitzt einen leistungsstarken Dual-Core Prozessor mit 1,2 GHz pro Kern. Als Arbeitsspeicher stehen 1 GB DDR 2 RAM zur Verfügung. Des Weiteren besitzt das Board neben insgesamt 2 USB-Schnittstellen auch einen SD/MMC-Card-Leser, der auch Karten mit hohen Geschwindigkeiten und hoher Speicherkapazität lesen kann. Eine SD-Karte dient im LEDA-K2 Projekt als Speichermedium für die gewonnenen Daten und Messwerte sowie für das Betriebssystem und die benötigte Software. Weiterhin besitzt das Board ein WLAN-Modul.

Wahl des Laserscanners

Aufgrund der möglichen geringen Zuladung des Hexakopters, ergab sich nur eine kleine Anzahl infrage kommender Kompaktscanner. Zudem sollte der Scanner eine entsprechend hohe Scannrate und Einzelpunktmessgenauigkeit bieten. In der näheren Auswahl wurden folgende Scanner betrachtet.

Parameter	Hokuyo UTM-30LX	Sick LD-MRS	Riegl VUX-1
Reichweite [m]	30	250	150
Genauigkeit [mm]	30	100	10
Scannrate [Hz]	43.200	50	500.000
Öffnungswinkel [°]	270	85	330
Abmessungen [mm]	60x60x85	94x165x88	227x180x125
Gewicht [g]	370	1000	3.600

Das Gerät der Firma Riegl verspricht die beste Scanleistung, sodass hier die besten Ergebnisse zu erwarten waren. Ein UAV, welches eine Masse von 3,6 kg tragen kann hat jedoch ein Gesamtabfluggewicht welches deutlich über 5 kg liegt. Da in Deutschland bei Geräten von unter 5 kg nur eine allgemeine Aufstiegsgenehmigung für den Betrieb benötigt wird, wurde entschieden, dass nur solche Systeme für das Projekt in Frage kommen. Somit wurde die Verwendung des Riegl VUX-1 beim LEDA-K2 Projekt ausgeschlossen.
Das Gewicht von ca. 1 kg des LD-MRS von Sick ist im Bereich der Nutzlast von auf dem Markt verfügbaren Drohnen, welche eine Maximum Takeoffweight (MTOW) von unter 5kg haben. Hier jedoch wurden die Scannleistungen für nicht ausreichend befunden. Zum einen können mit 50 Hz nur mit hohem zeitlichem Aufwand Produkte erstellt werden, die wie im herkömmlichen ALS Punktdichten von 10-20 Punkten/m² liefern. Zum anderen liegt die Genauigkeit mit 100 mm außerhalb der gewünschten Parameter. Das Gesamtsystem soll eine absolute Punktgenauigkeit von 10-20 cm aufweisen. Bei einer Genauigkeit von 10 cm des Laserscanners bleibt demnach zu wenig Spielraum für die Komponenten GPS und IMU.
Somit viel letztendlich die Wahl auf den UTM-30LX von Hokuyo. Die Parameter Gewicht und Abmessungen erlauben den Einsatz auf einem Multikopter mit einem MTOW von 5 kg. Die Scannrate und Genauigkeit sind ausreichend um Punktwolken entsprechend den Daten aus ALS-Befliegungen zu erzeugen. Lediglich die Reichweite von 30 m muss als einschränkender Faktor bewertet werden. Somit sind nur Flughöhen von ca. 25 m realistisch. Flächenhafte Erfassungen benötigen somit erhöhten Aufwand.
Für das gestellte Anwendungsfeld des LEDA-K2-Projektes, Profile entlang der Küste zu erfassen, ist dies jedoch ausreichend.



Kompaktlaserscanner Hokuyo UTM-30LX [Hokuyo 2009]

Die hinsichtlich des Projekts wichtigsten Daten des Laserscanners von Hokuyo sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Technische Spezifikationen Hokuyo UTM-30LX

Reichweite [m]	garantiert: 0,1 – 30 maximal: 0,1 – 60
Genauigkeit [mm]	Bei 3000 lx: auf weißem Papier ± 30 Bei 100000 lx: auf weißem Papier ± 50
Auflösung und Wiederholgenauigkeit [mm]	1mm Bei 3000 lx: σ =10 (weißes Papier bis zu 10 m) Bei 100000 lx : σ = 30 (weißes Papier bis zu 10 m)
Aufnahmewinkel [°]	270
Abtastungen pro Zeile	1080
Winkelauflösung [°]	0,25 (270°/1080 Abtastungen)
Scangeschwindigkeit [Hz]	40 (= 25 Millisekunden)
Gewicht [g]	210 (inklusive Kabel: 370)
Abmessungen [mm]	60 x 60 x 85
Messbedingungen [°C]	-10 ~ +50 weniger als 85% relative Luftfeuchte
Erhaltungstemperatur [°C]	-25 ~ +75
Energieverbrauch [Watt]	weniger als 8

Aufbau der Komponenten

Das Anbringen aller Komponenten an dem Hexakopter erfolgte durch die CiS GmbH in Rostock. Die folgende Abbildung zeigt die Drohne mit allen verbauten Komponenten. Der Laserscanner wurde horizontal an der Unterseite der Drohne befestigt.
Die Nullrichtung des Scanners ist dabei in Lotrichtung ausgerichtet. Das Krooz-Board samt IMU-Sensor befindet sich unter der Abdeckung der Drohne auf Höhe der Rotorstreben. Unter

dem Krooz-Board sind der Akku und darunter das PandaBoard platziert. Eine der sechs Rotorstreben ist rot und zeigt die Vorwärtsflugrichtung der Drohne an. Die GPS-Antenne befindet sich auf einem vertikal angebrachten Rohr, welches am Anfang der roten Rotorstrebe befestigt ist. Um eine Höhere Nutzlast realisieren zu können, wurden, anstelle der Verwendung eines Oktokopters, leistungsstärkere Motoren anstatt der Standardmotoren durch die CiS GmbH verbaut. Zusätzlich zur Stabilisierung der gesamten Flugeinheit, wurde Angelschnur von Rotorstrebe zu Rotorstrebe angebracht.



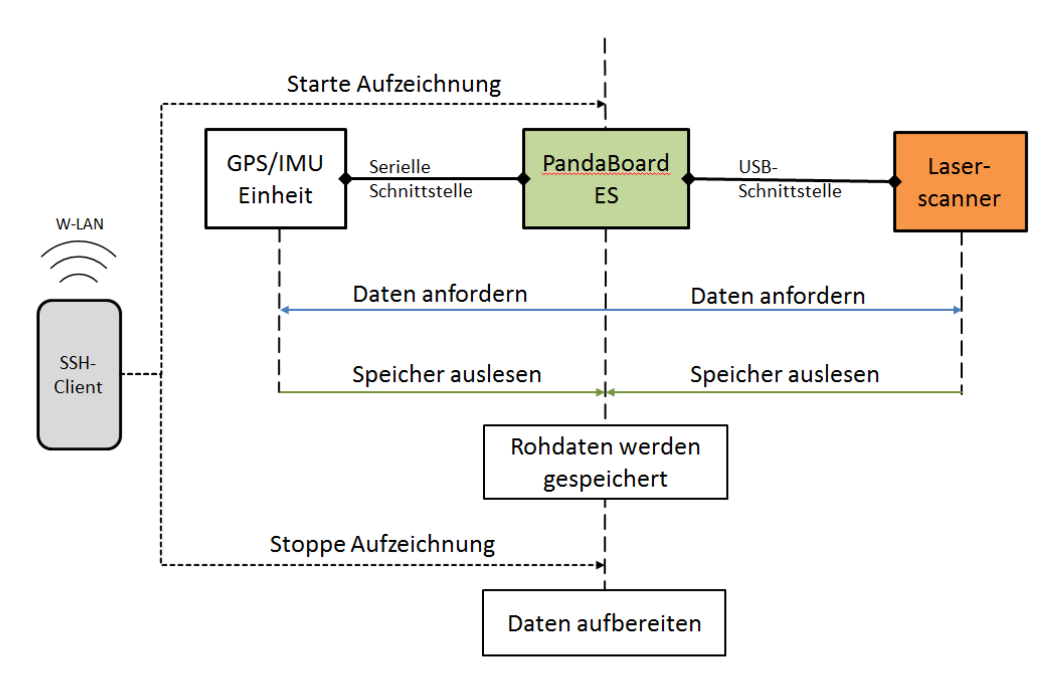
LEDA-K2 Hexakopterdrohne mit allen montierten Komponenten

Durchführung der Messung und Funktionsweise der Drohne

Das PandaBoard SE ist die Zentraleinheit des Systems, es steuert alle Geräte und dient mit eingesetzter SD-Karte als Speicher für die Daten. Auf dem Board ist ein UNIX-Betriebssystem installiert. Während das PandaBoard über eine USB-Schnittstelle mit dem Laserscanner Hokuyo UTM-30LX verbunden ist, erfolgt die Kommunikation der GPS/IMU-Einheit über eine serielle Schnittstelle. Durch einen WLAN Hotspot kann per SSH[1] Client mittels Smartphone oder Tablet auf die Konsole des UNIX-Betriebssystems des PandaBoards zugegriffen und das Board so ferngesteuert werden. Damit ist es möglich, per Fernsteuerung vom Boden aus eine Aufnahme zu beginnen oder zu stoppen.
Mit dem Einschalten der Stromversorgung aller Komponenten beginnen die GPS- und IMU-Einheit sowie der Laserscanner zu messen und Messungen werden ständig in die

[1] Secure Shell. Dient der sicheren Verbindung zu anderen Computern, um diese fernzusteuern. Gesendete oder empfangene Daten werden dabei verschlüsselt

geräteinternen Speicher geschrieben. Aufgezeichnet werden dabei die Daten jedoch noch nicht. Erst wenn der Befehl über die WLAN Verbindung an das PandaBoard kommt, spricht das Board sowohl den Laserscanner als auch die GPS/IMU-Einheit an. Dabei hat der Scanner mit 40 Hz eine niedrigere Messrate als die GPS/IMU-Einheit. Daher erfolgt das Auslesen von Scanner und GPS/IMU dann, wenn der Scanner eine Messreihe (einen Umlauf) in seinen Speicher übergeben hat. Die Daten von Scanner und GPS/IMU werden ausgelesen und an das PandaBoard übertragen. Im Board werden alle ankommenden Daten in den Gerätespeicher überführt. Aufgrund dieser Umsetzung gibt es zu jeder Messreihe genau eine Position und Orientierung. Erst wenn durch den Benutzer das Signal zum Stoppen der Aufzeichnung empfangen wird, erfolgt das Schreiben der Daten auf die SD-Karte.



Funktionsweise der LEDA-K2 Drohne als Prinzipablaufskizze

Dabei werden 3 Dateien angelegt. Eine Datei mit den Positions- und Orientierungsdaten, eine weitere mit den gemessenen Distanzen und eine mit den Intensitäten zu jeder Distanzmessung.

Die Positions- und Orientierungsdatei bekommt als Namen automatisch *GPS_7x1xN.raw*. Wobei 7x1xN für die Dimension des aufgezeichneten dreidimensionalen Datensatzes steht (N = Anzahl der Messreihen). Für N-Messreihen werden jeweils Sieben 1-dimensionale Werte geschrieben. Die Werte sind geografische Länge, geografische Breite, Höhe, Roll-, Pitch-, Yaw-Winkel und Zeit.

Nachfolgend ist ein Auszug aus einer Datei beispielhaft dargestellt:

Breite	Länge	Höhe	Roll	Pitch	Yaw	Zeit

3.659330e+005 4.721561e+004 2.010469e+002 1.776505e+000 1.776505e+000 -6.107260e+001 204768
3.659330e+005 4.721561e+004 2.010469e+002 1.776505e+000 1.790493e+000 -6.107260e+001 204845

Dabei bedürfen die Länge (L), Breite (B) und Höhe (H) noch einer Umrechnung:

$$B = B' * \frac{256 * 180}{100.000.000 * \pi}$$

$$L = L' * \frac{256 * 180}{100.000.000 * \pi}$$

$$H = \frac{H'}{1000}$$

Aufgrund der seriellen Schnittstelle zwischen GPS/IMU und dem PandaBoard ist die Übertragung gelegentlich nicht vollständig, bevor die GPS/IMU-Einheit vom Board erneut angesprochen wird. In diesem Fall werden siebenmal „-1“ in die betreffende Zeile der Positions- und Orientierungsdatei geschrieben, anstatt korrekter Werte. Diese Datenlücken werden im späteren Auswerteprozess durch Interpolation aufgefüllt.
Die Distanz- und Intensitätsdatei haben denselben strukturellen Aufbau und weisen die gleiche Dateigröße auf der Festplatte auf. Der Dateiname fügt sich zusammen aus der Bezeichnung („Distance“ oder „Intensity“), Anzahl der Messungen pro Messreihe (1082, Erklärung siehe weiter unten), der Dimension (1) und einem variablen Wert (M) für die Anzahl der aufgenommenen Messreihen. Nach diesem Schema ergeben sich die Namen wie folgt: *Distance_1082x1xM.raw* bzw. *Intensity_1082x1xM.raw*. Der Scanner inkrementiert 1080-mal in 0,25 Grad Schritten pro Umlauf, wodurch 1081 Messungen ausgeführt werden. Zusätzlich dazu steht in jeder Zeile der Distance- und Intensity-Datei am Ende die Zeit. Aufgrund dessen ergeben sich als Spaltendimension 1082 Werte. Weiterhin ist M, die Anzahl der Messreihen, um eins größer, als der Wert N in der dazugehörigen Positions- und Orientierungsdatei, da in der ersten Zeile zusätzlich die Winkelinkrementierung als ganze Zahlen ausgegeben wird. Diese beginnt bei -540 und endet mit 540, wobei mit jeder fortlaufenden Zahl um 0,25° hochgezählt wird (1 = 0,25°; 540 = 135°). Nach der ersten Zeile folgt in jeder darauffolgenden Zeile eine Messreihe mit den gemessenen Distanzen bzw. Intensitäten zu jedem Winkelinkrement. Dabei werden die Distanzen in ganzen Millimetern angegeben. Zur Veranschaulichung wird im Folgenden ein Ausschnitt aus einer Distanz- und einer Intensitätsdatei dargestellt.

Distanzdatei:

-540 -539 -538 -537 -536 -535 -534 -533 -532 ….. 532 533 534 535 536 537 538 539 540 0
104 114 118 120 118 115 115 114 114 ….. 99 99 94 83 83 82 82 82 79 535404
121 121 126 128 128 119 119 118 118 ….. 87 87 82 80 68 68 80 80 67 535430
104 108 130 130 130 130 113 113 107 ….. 86 84 78 77 77 77 78 78 78 535455

Intensitätsdatei:

-540 -539 -538 -537 -536 -535 -534 -533	…..	533 534 535 536 537 538 539 540 0
757 775 740 632 570 617 482 445	…..	929 1096 1362 1567 1791 1976 1935 1906 535404
770 775 657 652 648 552 532 440	…..	904 1090 1293 1538 1787 1917 1971 1929 535430
790 755 738 647 568 556 528 475	….	949 1114 1332 1516 1843 1952 1922 1905 535455

In dem Fall, dass zum Scanner kein Signal zurückkehrt, wird in die Distanzdatei an die betreffende Stelle eine „1“ und in die Intensitätsdatei eine „0“ geschrieben.

Aufnahmeablauf

Ein Vorteil einer Hexakopterdrohne (aber auch aller anderen Kopterdrohnen) ist die einfache Steuerung. So ist fast keinerlei Modellflugerfahrung notwendig, um die Drohne halbautomatisch zu steuern. Sie bleibt eigenständig auf ihrer aktuellen Position und kann mit der Fernbedienung in jede beliebige Richtung bewegt und um die z-Achse gedreht werden.

Zur Berechnung der maximalen Flughöhe für den LEDA-K2 Hexakopter, wird angenommen, dass, wie bei seinem größeren Pendant in der ALS-Befliegung, ebenfalls 60° als Aufnahmewinkel gewählt wird. Aufgrund der 60° als Aufnahmewinkel ergibt sich zur Berechnung ein gleichseitiges Dreieck. Somit ist Streifenbreite und Schrägstrecke gleich der maximal garantierten Reichweite von 30 m. Über die Formel für die Höhe h bei einem gleichschenkligen Dreieck ergibt sich:

$$h = \frac{30\,m}{2} * \sqrt{3} = 25{,}98\,m$$

Als theoretisch maximale Flughöhe der Drohne wird daher 25 m über der Erdoberfläche angesetzt.

Vorbereitung im Innendienst

Neben der Kontrolle, ob alle Gegenstände und Materialien vorhanden und funktionstüchtig sind, müssen auch alle benötigten Akkus vollgeladen sein. An der LEDA-K2 Drohne sind alle Bestandteile fest verbaut, weshalb, neben Fernbedienung, Laptop und Funkantenne, nicht auf benötigte Kleinteile geachtet werden muss. Des Weiteren erfolgt eine visuelle Prüfung der Drohne, wozu die sechs Rotoren und Rotorstreben samt Motoren, Steckverbinder, Kabel und die Befestigung für den Scanner zählen.

Für einen vordefinierten autonomen Flug der Drohne sind georeferenzierte Luftbilder oder Umringe des Gebietes zu beschaffen, die in die Planungssoftware eingelesen werden können.

Flugvorbereitung und Start

Die Flugvorbereitung findet vor Ort an der Stelle statt, an der der Start vorgesehen ist. Der Start- und Landeplatz sollte so gewählt werden, dass nicht zu viel Staub, Dreck oder kleine Steinchen durch den Start aufgewirbelt werden, die den Scanner oder die Drohne selbst eventuell beschädigen. Ist ein Startpunkt gefunden, können Antenne und Laptop aufgebaut und miteinander verbunden werden.

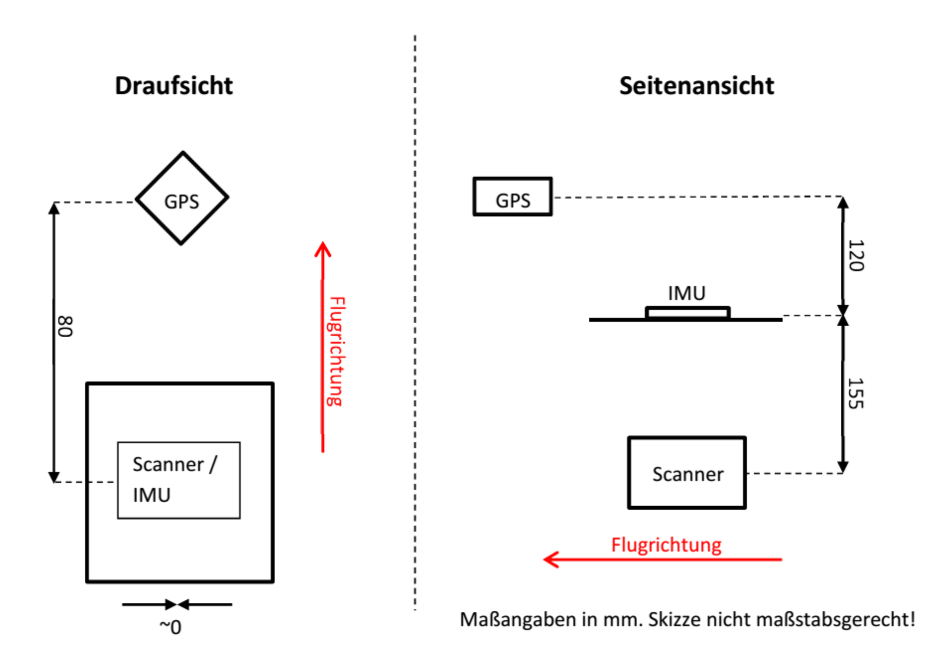
Nun wird die Drohne aus der Transportkiste genommen und anschließend kann einer der Akkus an der Drohne befestigt werden. Je nachdem, ob ein autonomer oder manueller Flug der Drohne geplant ist, kann das Programm *UAV Mobil* für die Flugplanung gestartet werden. Start- und Landepunkt werden manuell vorgegeben und anhand der festgelegten Startrichtung und dem Umring erfolgt die automatische Erstellung der Flugstreifen. Dabei ist eine ausreichende Überlappung der Scanstreifen einzustellen, damit möglichst keine Lücken in dem Aufnahmegebiet entstehen. Nach der Flugroutenplanung wird die Fernbedienung eingeschaltet und im Anschluss daran wird der Flug-Akku mit dem UAV verbunden. Am Laptop erfolgt die Übertragung der Flugroutenpunkte an die Steuerungseinheit der Drohne per Funk. Damit die aktuelle Position genau genug bestimmt ist, muss noch eine „fixed"-Lösung für die GPS-Positionierung von der Navigationssoftware gerechnet werden. Danach kann entweder der automatische oder halbautomatische Start der Drohne beginnen.

Autonomer Flug und Landung

Nach dem Start begibt sich das Fluggerät auf die Startposition und behält die Position so lange bei, bis die vorgegebene Flugroute beginnen soll. Während des autonomen Fluges, kann die Drohne jederzeit halbautomatisch gesteuert werden, um bspw. Gefahrensituationen auszuweichen. Sollte die Akkuleistung nicht ausreichen, fliegt die Drohne automatisch zum angegebenen Zielpunkt und ist bereit für die Landung. Der Befehl zum Starten der Sensoren über den SSH Client ist im autonomen Flug nicht mit integriert und muss daher manuell durchgeführt werden. Die Drohne kann mit dem mitgeführten Akku ca. 12 bis 15 Min. in der Luft bleiben. Nachdem die vorgegebene Flugroute durchflogen wurde, fliegt die Drohne selbstständig zum definierten Zielpunkt. Dort kann der Steuerer die Drohne übernehmen und die Landung manuell durchführen. Bei der Landung sollte darauf geachtet werden, dass sich in der Landezone möglichst keine Kleinteile befinden, die vom Wind aufgewirbelt werden könnten und so Teile der Drohne beschädigen. Je nach Aufnahmegebiet erfolgt zu diesem Zeitpunkt eine weitere Befliegung. Im Anschluss an die Befliegung werden die Daten von der SD-Karte auf eine Festplatte gesichert.

Prozessieren der Rohdaten

Bei einer Aufnahme mit der LEDA-K2 Drohne werden insgesamt drei Dateien erzeugt (pro Scanstreifen). Dazu zählen eine Positionsdatei, eine Datei mit den gemessenen Strecken und eine Datei mit den zugehörigen Intensitätswerten. Zudem werden die Leverarm-Vektoren von der GPS-Antenne zur IMU-Einheit und vom Scannermittelpunkt (Ursprung der Streckenmessungen) zur IMU-Einheit bestimmt. Die Werte sind in der folgenden Abbildung in Form einer Prinzip-Skizze dargestellt.



Anordnung und Abstände zwischen GPS-Antenne, IMU-Chip und Scannermittelpunkt

Dabei zeigt die x-Achse in Flugrichtung und die y-Achse liegt dazu senkrecht in der Horizontalebene. Die z-Achse steht entsprechend senkrecht auf der Horizontebene und zeigt in Richtung Zenit. Die Vektoren sind so ausgerichtet, dass sowohl die Signale von der GPS-Antenne als auch die Messungen des Laserscanners zum IMU-Chip gerechnet werden können.

Anhand dieser Daten können nun 3D-Punkte berechnet werden. Eine GPS-Position und IMU-Orientierung (in drei Dimensionen) wurde dabei für jeweils eine Messzeile (1 Messzeile = 1081 Messungen) des Laserscanners abgelegt. Zur Berechnung von 3D-Punkten wird die Position und Orientierung zu jeder Messung benötigt. Aufgrund dessen erfolgt eine Interpolation zwischen Positions- und Orientierungsangaben. Durch die erstmalige Anwendung einer Drohne mit Laserscanner bei der MILAN Geoservice GmbH stand bis zu diesem Zeitpunkt noch kein Programm zur Verfügung, um die speziellen Ausgabeformate in 3D-Punkte umzurechnen.

Ziel war es daher, ein Programm zu erstellen, welches die Daten in ein bereits im ALS-Auswerteablauf verwendeten Dateiformat ausgibt, um die vorhandene Prozesskette zu nutzen. Das vorhandene Programm der MILAN Geoservice GmbH (‚SDC-Prog‘) benötigt die Daten im SDC-Format und die zugehörige Positionsdatei (‚*.pos*‘) einschließlich der Orientierungswinkel. Das SDC-Format ist ein Aufzeichnungsformat der Firma Riegl und wird im ALS-Auswerteablauf durch das Programm *RiANALYZE* erzeugt. Die SDC-Datei wurde in der Version 5.4 erstellt und hat den vom *RiANALYZE* Benutzerhandbuch definierten Aufbau:

```
TIME       : DOUBLE;  // seconds of the day or of the week, depending
on GPS string
RANGE      : SINGLE;  // measured range value [m]
THETA      : SINGLE;  // measured theta value [deg]
X, Y, Z    : SINGLE;  // x, y, z value of point in scanner’s own
coordinate system [m]
AMPLITUDE  : WORD;    // linearized amplitude
WIDTH      : WORD;    // width of target return (full width half
maximum) [0.1 ns]
TARGETTYPE : BYTE;    // 0.. COG, 1.. PAR, 2.. GPF, 3 to 5.. GPE
TARGET     : BYTE;    // index of target (1.. NUMTARGET)
NUMTARGET  : BYTE;    // total number of measurement
RGINDEX    : WORD;    // range gate index of measurement
CHANNELDESC: BYTE;    // channel descriptor
CLASSID    : BYTE;    // class identifier
RHO        : SINGLE;  // tile mount angle [deg]
REFLECTANCE: SMALLINT;// reflectance [0.01 dB]
```

Nicht alle in der Dateidefinition beschriebenen Attribute einer Messung sind von Bedeutung. Die Attribute TIME, RANGE, THETA, X, Y, Z und AMPLITUDE werden zur Berechnung von 3D-Punkten benötigt. Bei dem Attribut TIME wird die Zeit eingesetzt, um der Messung die korrekte Position und Orientierung zuordnen zu können. RANGE ist die gemessene Distanz, THETA der Abtastwinkel des Scanners und AMPLITUDE der Intensitätswert der Messung. X, Y und Z sind die Koordinaten des gemessenen Punktes im Koordinatensystem des Scanners. An die Stellen für die übrigen Attribute werden Standardwerte gesetzt.

Die Positionsdatei (*.pos*) dagegen besteht in jeder Zeile aus sieben Werten. Zuerst die Zeit, um die Zuordnung der korrekten Messung in der SDC-Datei zu gewährleisten und der GPS-Position (Breite, Länge, Höhe) sowie den drei Orientierungswinkeln.

Detaillierte Inhalte des Programms ‚SDC-Prog‘ werden in dieser Arbeit nicht wiedergegeben, da es sich dabei um das selbstverfasste Auswerteprogramm der MILAN Geoservice GmbH handelt, mit dem aktuelle ALS-Daten prozessiert werden. Es erfolgt daher eine kurze, allgemeine Beschreibung des Programmablaufs und des Funktionsumfangs.

Das Programm zur Erzeugung der SDC- und Positionsdatei *create_sdc_file.m* wurde in *MATLAB* geschrieben und funktioniert wie folgt.

In einem ersten Schritt muss eine Textdatei geschrieben werden, die beinhaltet, welche Messungen verarbeitet werden sollen. Dazu reicht die Angabe der Nummer zusammen mit der Anzahl der Messzeilen aus. Nach der Auswahl der Textdatei werden die vollständigen Namen der drei Dateien mit der Nummer und Anzahl der Messzeilen gebildet, da die Dateien immer mit demselben Aufbau abgelegt werden. Im Anschluss daran liest das Programm für jeden Scanstreifen die drei RAW-Dateien ein.

Weiterhin wurden die Positionsangaben vom PandaBoard der Drohne in abgewandelter Form abgelegt. Diese Umrechnung war aufgrund der geringen Bandbreite zwischen den Systemkomponenten der LEDA-K2 Drohne notwendig. Die Positionen werden durch das Programm wieder in ellipsoidische Koordinaten im Gradmaß als Dezimalzahl umgerechnet. Danach erfolgt die Interpolation zwischen zwei GPS- und IMU-Einträgen für die dazwischenliegenden Lasermesswerte. Dabei wird geprüft, ob ungültige Positionen vorliegen (Einträge mit „-1“). Im Anschluss daran erfolgt die lineare Interpolationen zwischen den Werten. Die Verwendung einer an die Flugbahn besser angepassten Interpolationsmethode (polynomial, kubisch etc.) versprach keine signifikante Genauigkeitssteigerung in der Positions- und Orientierungsbestimmung. Nach dem Zusammenführen aller Werte (Zeit, Position, Orientierung, Distanz, Intensität, Aufnahmewinkel des Scanners) in eine Rohdatenmatrix, wurden die Positions- und Orientierungsangaben für jede Messung aufgefüllt. Anschließend wurde diese Matrix von Zeileneinträgen befreit, in der noch ungültige Positions- und Orientierungswerte (-1), oder ungültige Distanz- (1) und Intensitätswerte (0) vorkamen. Nach diesem Schritt werden die Daten als SDC- und Positionsdatei (.pos) abgespeichert werden.

SDC- und Positionsdatei sowie die Leverarm-Vektoren gehen in das Programm ‚SDC-Prog‘ der Firma MILAN Geoservice GmbH ein. Neben der Kalibrierung der Boresight-Winkel, wird hierbei auch die Berechnung der 3D-Punkte durchgeführt. Die Annäherung an diese findet dabei iterativ statt. Nach jeder Iteration erfolgt die Berechnung erneut. Ergibt sich keine signifikante Änderung der Winkel mehr (weniger als 0,001° Änderung), stoppt die Iteration und die Boresight-Winkel sind damit ausreichend genau bestimmt. Weiterhin kann das Programm die ermittelten Koordinaten in ein Benutzerkoordinatensystem (GK, UTM etc.) transformieren.

Bei größeren Gebieten können die Punkte zudem in gleichmäßige Kacheln (z. B. 1000x1000 Meter) unterteilt werden, um die anschließende Weiterverarbeitung übersichtlicher zu gestalten und zu vereinfachen. Ausgegeben werden, können die Punkte bspw. als einfache ASCII-Koordinatendateien oder als LAS-Dateien.

Genauigkeitsbetrachtungen

Genauigkeit und Verlässlichkeit der IMU-Einheit

Ziel dieser Untersuchung war, Erkenntnisse über die Genauigkeit samt Auflösungsvermögen, sowie über die allgemeine Verlässlichkeit der IMU-Einheit zu erlangen.

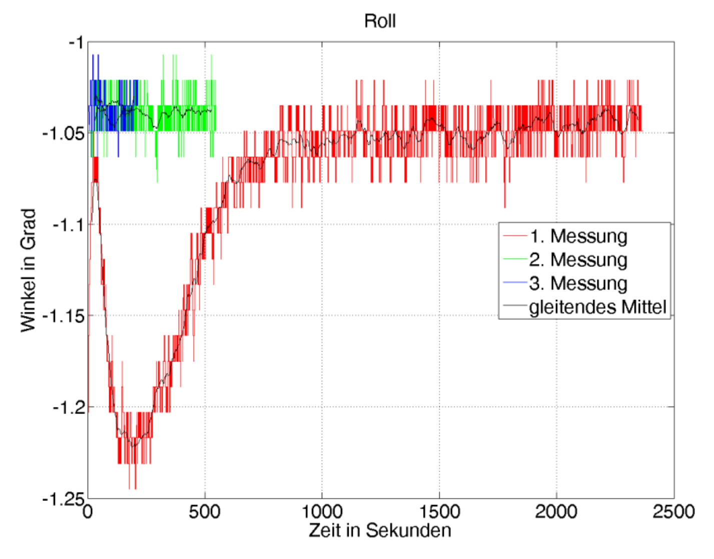
Untersuchungsablauf

Die IMU-Einheit wurde zusammen mit der GPS-Antenne, PandaBoard und Laserscanner auf einem Holzbrett befestigt. Diese Konstruktion sollte den Aufbau der Drohne nachstellen. Zur Überprüfung der zufälligen Fehler der IMU-Einheit, wurden mehrere Messungen durchgeführt bei denen die Konstruktion weder bewegt (keine Translation) noch gedreht (keine Rotation) wurde. Real verändern sich die IMU-Werte damit also nicht und dürften zumindest theoretisch gleich bleiben. Dabei wurde zunächst eine längere Messung durchgeführt (ca. 40 Minuten) und anschließend noch zwei kürzere Messungen (ca. 9 Minuten und ca. 3,5 Minuten). Zwischen den Messungen wurde die Aufzeichnung der Sensoren gestoppt. Die zwei Folgemessungen sind nur wenige Minuten lang, da man den angezeigten Werten entnehmen konnte, dass keine signifikante Änderung wie bei der ersten Messung zu erkennen war.

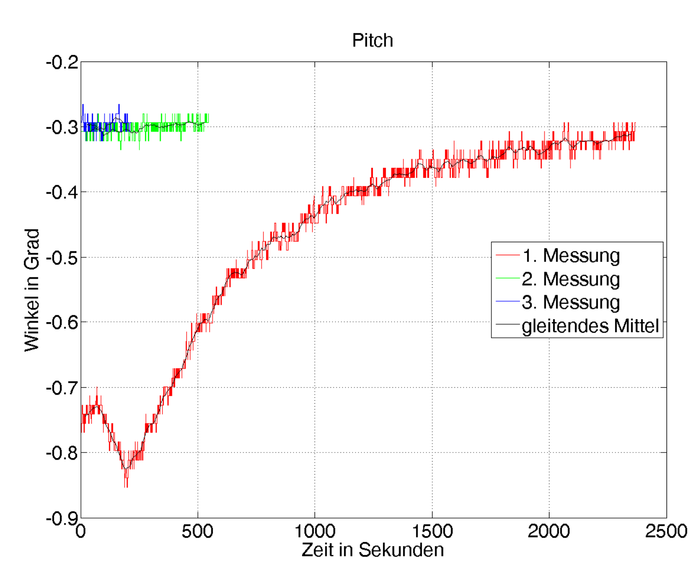
Zu einem späteren Zeitpunkt wurde mit der fertigen Drohnenkonstruktion erneut der gleiche Testlauf durchgeführt. Dabei jedoch mit laufenden Motoren im Stand. Dies diente dazu, den Einfluss der Vibrationen der Motoren auf das Verhalten der IMU-Einheit festzustellen. Die Ergebnisse zu diesem Testlauf finden sich im Anschluss an die erste Untersuchung der IMU-Einheit.

Ergebnisse

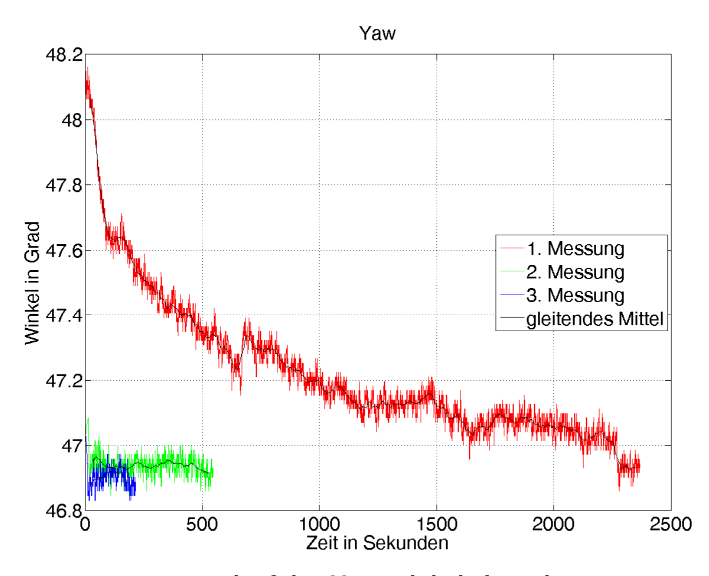
Zunächst wurden die gewonnenen Daten der ersten Untersuchung mithilfe von MATLAB ausgewertet und für jeden Winkel (Roll, Pitch, Yaw) separat grafisch dargestellt.



Verlauf des Roll-Winkels in Ruhe



Verlauf des Pitch-Winkels in Ruhe



Verlauf des Yaw-Winkels in Ruhe

Es ist deutlich zu erkennen, dass jeder der drei Orientierungswinkel bei der ersten Messung (jeweils rote Datenreihe) sich über die Zeit einem Wert immer weiter annähert. Nach 30 bis 40 Minuten ist nur noch eine geringfügige Veränderung festzustellen. Die beiden Folgemessungen (jeweils grüne und blaue Datenreihe) zeigen, dass eine erneute Annäherung nicht stattfindet. Auch nicht nach Beendigung einer Messung und anschließendem Neustart. Nach einer Einlaufzeit bleiben die aufgezeichneten Daten um einen Mittelwert relativ stabil. Grund dafür könnte sein, dass die IMU-Einheit erst bei Erreichen ihrer Betriebstemperatur zuverlässig arbeitet.

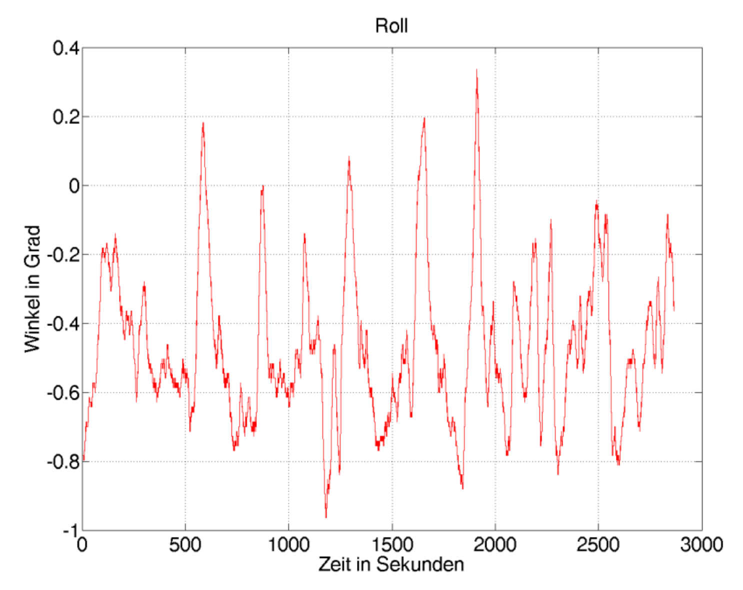
Des Weiteren wurde ein gleitendes Mittel über 1001 Werte (500 davor sowie 500 danach) auf alle Datenreihen angewendet (schwarze Linien in allen drei Graphiken), um Aussagen über die Streuung der gemessenen Winkel treffen zu können. Daraus konnten Standardabweichungen für jeden der drei Winkel in jeder der drei Messungen errechnet werden. Die Erste beinhaltete 64184 aufgezeichnete Werte für jeden der drei Orientierungswinkel. Die Zweite beinhaltete 14175 und die Dritte 5705. Aus diesen Daten und den entsprechenden gleitenden Mitteln wurden folgende Standardabweichungen berechnet:

Standardabweichungen für die einzelnen Orientierungswinkel in drei Messungen

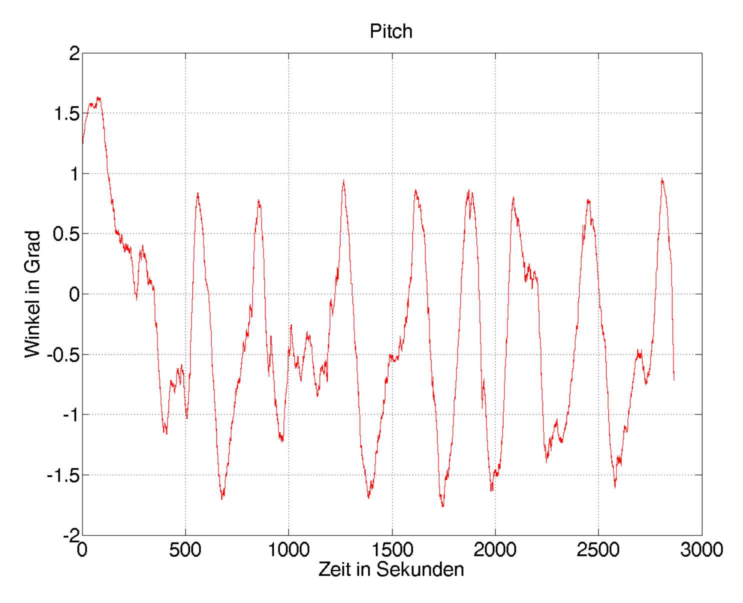
	Messung 1:	**Messung 2:**	**Messung 3:**	**Durchschnitt**
Std-abw. Roll [°]	0,0108	0,0092	0,0097	**0,0099**
Std-abw. Pitch [°]	0,0099	0,0095	0,0085	**0,0093**
Std-abw. Yaw [°]	0,0255	0,0237	0,0231	**0,0241**

Während sowohl der Roll- als auch der Pitch-Winkel eine Standardabweichung von knapp unter 0,01° aufweisen, ist die Genauigkeit des Yaw-Winkels mit 0,0241° nahezu um den Faktor 2,5 schlechter. Da über Winkelgenauigkeiten nicht direkt Rückschlüsse über Auswirkungen auf die Position eines 3D-Punktes gezogen werden können, wird nun betrachtet, wie stark sich die Orientierungswinkel bei einer Abweichung des Punktes von 10 cm in der Lage ändern. Dafür wird der Extremfall betrachtet, d. h. die Winkelabweichungen bei Messungen am Rand eines Scanstreifens. Die Winkelabweichungen im Pitch- und Yaw-Winkel können beide über die Winkelfunktionen im rechtwinkligen Dreieck (siehe Gruber / Joeckel 2007 S. 25) berechnet werden und sind mit 0,19° gleich. Die Abweichung im Yaw-Winkel fällt mit 0,17° dabei etwas geringer aus und wurde über die Winkelfunktionen im allgemeinen Dreieck ermittelt (siehe Gruber / Joeckel 2007 S. 27). Die festgestellten Standardabweichungen in den Orientierungswinkeln fallen jedoch mit maximal 0,0241° im Yaw-Winkel bei weitem geringer aus.

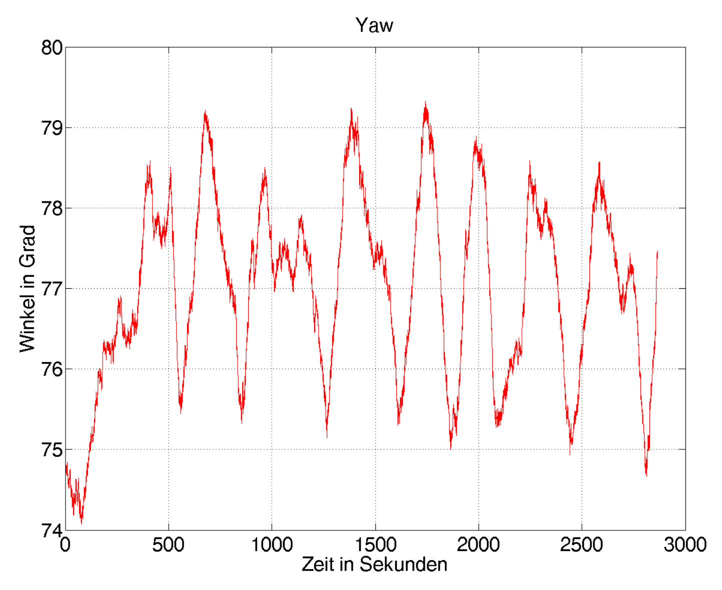
Aufgrund der Annäherung der Orientierungswinkel beim Einschalten der Drohne wurden durch die CiS GmbH Winkelkorrekturwerte in Abhängigkeit von der Temperatur in das Drohnensystem integriert.
Bei einem erneuten Test der IMU-Einheit, nunmehr mit laufenden Rotoren, wurde eine Messung mit einer Dauer von ca. 40 Minuten durchgeführt. Genau wie bei dem vorherigen Untersuchungsprozess wurden die Daten mit MATLAB für jeden Orientierungswinkel separat grafisch dargestellt (siehe 0 bis 0).



Verlauf des Roll-Winkels in Ruhe bei laufenden Motoren



Verlauf des Pitch-Winkels in Ruhe bei laufenden Motoren



Verlauf des Yaw-Winkels in Ruhe bei laufenden Motoren

Bei dieser Messung sind sinusförmige Schwankungen aller drei Winkel zu beobachten. Diese scheinen von den Vibrationen der laufenden Motoren auszugehen. Mit einer Spannweite von ca. 3,5° im Yaw-Winkel sind die Schwankungen als schwerwiegend einzuordnen. Während die in der vorherigen Untersuchung festgestellte Annäherung der IMU-Winkel im Roll-Winkel nur noch in geringem Maße festzustellen ist, fällt sie im Pitch- und im Yaw-Winkel allerdings größer aus. Dies ist zum einen auf die weiterhin vorhandene Annäherung der Orientierungswinkel zurückzuführen, zum anderen auch auf den sinusförmigen Verlauf aufgrund der Motorvibrationen.

Fazit

Aus dieser Untersuchung ergab sich die Erkenntnis, dass sich die drei Orientierungswinkel der IMU-Einheit innerhalb von etwa 30 Minuten jeweils einem Wert annähern. Erst nach dieser Zeit können die einzelnen Messreihen relativ zueinander passen. Nach dem Anbringen von Korrekturwerten in Abhängigkeit von der Temperatur konnte dieses Verhalten jedoch nicht vollständig ausgeglichen werden. Die festgestellten Schwankungen bei laufenden Motoren im Stand üben einen großen Einfluss auf die Orientierungswinkel aus. Jedoch konnte nicht geklärt werden, ob der Einfluss so groß bleibt, wenn sich die Drohne mit laufenden Rotoren in der Luft befindet und nicht am Boden. Des Weiteren laufen die Rotoren im Stand nur auf einem Bruchteil ihrer Leistung. In weiteren Untersuchungen wäre demnach zu klären, wie groß der tatsächliche Einfluss auf die Orientierungswinkel bei einem Flug mit entsprechender Gebrauchsleistung tatsächlich ist.

Genauigkeit und Verlässlichkeit des GPS-Chipset UBX-G5000/G0010

In dieser Untersuchung sollen Erkenntnisse über die absolute Positionierungsgenauigkeit der Drohne mit dem verwendeten GPS-Chipset UBX-G5000/G0010 gewonnen werden. Seitens des Herstellers wurde eine absolute Positionierungsgenauigkeit von etwa 2,5 m angegeben.

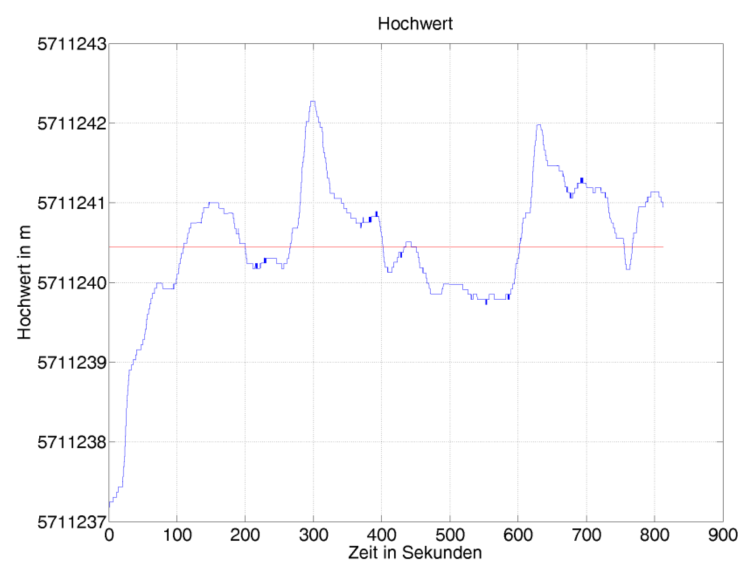
Untersuchungsablauf

Zur Untersuchung der Positioniergenauigkeit, wurde die Drohne auf einem Stativ mit der GPS-Antenne über einem per GNSS RTK-Messung[2] (Real-Time-Kinematic) bestimmten Punkt aufgestellt. Durch die Verwendung eines Statives sollten Multipath-Effekte durch den glatten Betonboden weitestgehend eliminiert werden. Die gemessene GNSS-Position wurde in GK-Koordinaten umgerechnet. Da die GPS-Antenne bereits fest auf der Drohne verbaut ist, war eine exakte Zentrierung über dem bekannten Punkt nicht möglich. Mithilfe eines einfachen Lotes wurde die Zentrierung über dem Messpunkt auf wenige Zentimeter genau vorgenommen. Die Aufzeichnung der Positionsdaten erfolgte für knapp 13 Minuten.

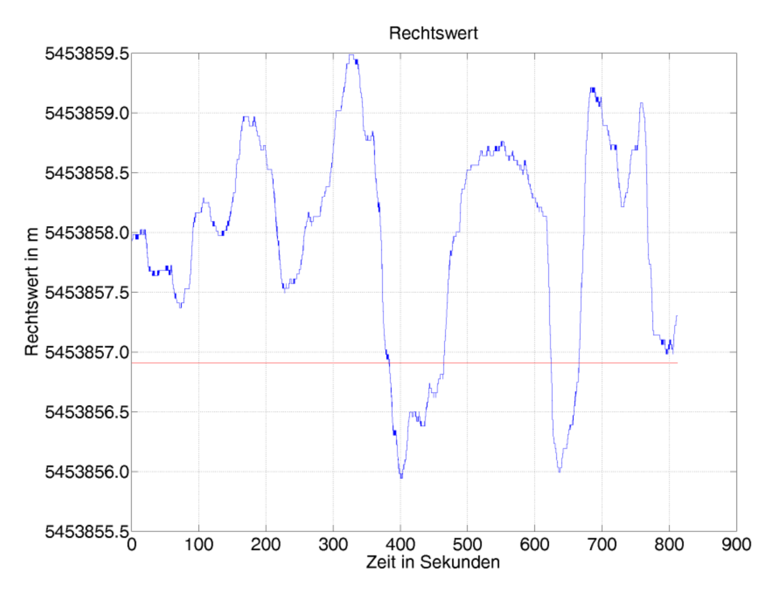
[2] RTK ist ein differentielles Echtzeit-GNSS-Positionierungsverfahren, das Korrekturwerte von einer genau bestimmten Referenzstation erhält. Mit RTK können Positionen absolut genauer als 2 cm bestimmt werden.

Ergebnisse

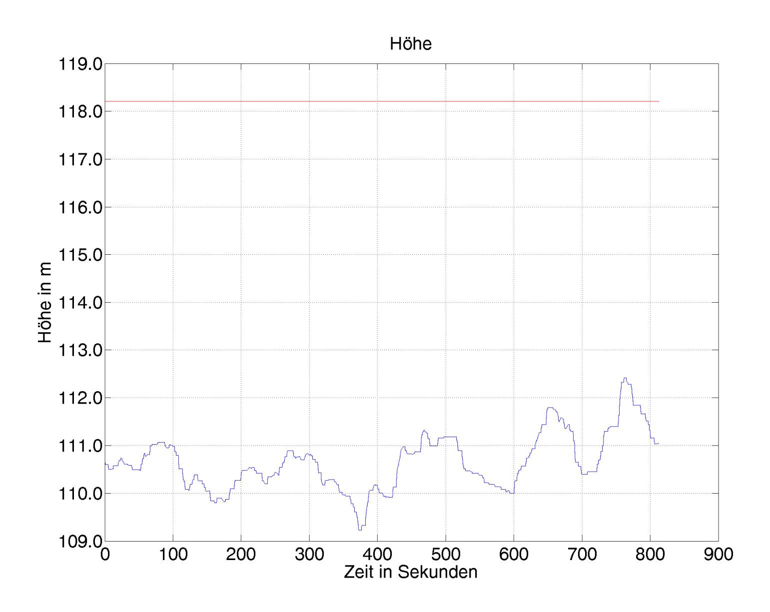
Nach der Messung wurden die aufgezeichneten Positionsdaten in MATLAB eingelesen und der vertikale Abstand des Referenzpunktes zur GPS-Drohnenantenne von den gemessenen Höhen abgezogen. Im Anschluss wurden der Verlauf der drei Dimensionen (blaue Linien) sowie die per GNSS bestimmte Koordinate (rote Linie) für jede Dimension in den folgenden Abbildungen grafisch dargestellt.



Verlauf des Hochwertes



Verlauf des Rechtswertes



Verlauf der Höhe

Während die gemessenen Hoch- und Rechtswerte jeweils um die Referenzwerte in zu erwartendem Maße streuen, weichen die Höhenwerte mit ca. 7 m erheblich von der Referenzhöhe ab. Aufgrund der geringeren Lageabweichung gegenüber dem großen Höhenversatz ist anzunehmen, dass der Fehler einem internen Rechen- oder Umrechnungsfehler geschuldet ist. Da die Ursache bisher noch nicht identifiziert werden konnte, muss ggf. eine Höhenanpassung an Referenzdaten erfolgen. Im Folgenden kann daher für die gemessene Position keine absolute Positionsgenauigkeit (3D) angegeben werden, sondern lediglich eine Lagegenauigkeit (2D). Zusätzlich zur absoluten Lagegenauigkeit wurde die relative Lage- und Positionsgenauigkeit berechnet.

Absolute Lagegenauigkeit:	1,616 m
Relative Lagegenauigkeit:	1,215 m
Relative Positionsgenauigkeit:	1,347 m

Trotz der fehlenden Höhengenauigkeit, weist die absolute Lagegenauigkeit einen realistischen Wert von rund 1,6 m auf. Wird die GNSS-Referenzmessung nicht mit einbezogen, so erhalten wir eine relative Positionsgenauigkeit unter 1,5 m. Jedoch schwanken die gemessenen Positionen innerhalb des Zeitraumes von 13 Minuten mitunter stark (Hochwert und Höhe bis zu 2 m; Rechtswert bis 3,5 m). Wird durch die LEDA-K2 Drohne eine längere Spur geflogen, kann sich dies stark auf den Verlauf eines Scanstreifens auswirken.

Fazit

Durch die Untersuchung konnte festgestellt werden, dass bei der Positionsbestimmung ein Höhenfehler von ca. 6 bis 7 m vorliegt, dessen Ursache noch nicht identifiziert werden konnte. Gemessene Scanstreifen müssen daher in der Höhe entsprechend an Referenzdaten angepasst werden. Die erhaltene absolute Lagegenauigkeit liegt mit 1,6 m in einem Bereich entsprechend der Herstellerangaben. Für eine genauere Georeferenzierung muss die Ursache für den Höhenfehler identifiziert werden.

Untersuchung zur Genauigkeit des Laserscanners Hokuyo UTM-30LX

Der verwendete Kompaktlaserscanner Hokuyo UTM-30LX wurde bereits in der Bachelorarbeit von Marlen Schreiter im Jahr 2012 an der Technischen Universität Dresden am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung eingehend untersucht. Neben der Feststellung der Distanzmessgenauigkeit war auch die tatsächliche Winkelgenauigkeit Ziel der Untersuchungen.

Distanzmessgenauigkeit

Die Analyse von Distanzmessungen aus verschiedenen Entfernungen (5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 23 m) vom Laserscanner zu einer Zieltafel zeigte, dass die Standardabweichung als Kenngröße für die Messgenauigkeit linear mit der Entfernung ansteigt. So erhöht sich die Standardabweichung um 0,6 mm pro Meter (angefangen mit 0,6 mm bei 1 m bis 18 mm bei 30 m). Mit einer mittleren Abweichung der gemessenen Distanzen von 7,9 mm von den Solldistanzen erwies sich die Genauigkeit besser als vom Hersteller angegeben. Der größte Störfaktor bei den Distanzmessungen des Kompaktlaserscanners ist der Durchmesser des auftreffenden Laserstrahls auf dem Messobjekt. Durch den größer werdenden Messstrahl bei zunehmender Entfernung kommt es bei weit entfernten Zielen zu Mischsignalen und damit zu ungenauen Streckenmessungen. Die Ergebnisse der Untersuchungen haben gezeigt, dass der Kompaktlaserscanner für den mobilen Einsatz geeignet ist.

Winkelgenauigkeit

Auch auf die Winkelgenauigkeit hat der Durchmesser des auftreffenden Laserstrahls einen großen Einfluss. Bei einem besonders großen Durchmesser können Kanten nicht genau genug bestimmt werden, da es zu Mischsignalen kommt. Daher wurde der Scanner nach jeder Messepoche um 2 mm verschoben.

Wenn eine signifikante Änderung bei einer der Lasermessungen auftrat, wurde ein Winkelschritt detektiert. Die Detektion von Kanten durch Augenmaß zur Ermittlung der Winkelschrittweite ist somit fehlerbehaftet und musste subjektiv geschätzt werden. Trotz der genannten Nachteile traten nur geringfügige Abweichungen vom Sollwert von 0,25° (1080 Messungen in einem Sichtfeld von 270°) auf. Die durch die Untersuchungen festgestellte Winkelgenauigkeit von 0,001°, würde auf die maximal garantierte Zielweite (30 m) einen Lagefehler von 0,5 mm bewirken.

Fazit

Die Distanzmessgenauigkeit des Kompaktlaserscanner Hokuyo UTM-30LX wurde durch die Untersuchungen überprüft und für besser befunden als vom Hersteller angegeben. Auch die festgestellte Winkelgenauigkeit von 0,001° wirkt sich nur minimal auf eine Punktkoordinate bei maximaler Messentfernung aus.

Untersuchung des Zusammenspiels der LEDA-K2 Systemkomponenten

Die folgenden Untersuchungen dienten zur Erfassung der Auswirkungen von äußeren Einflüssen auf einzelne Komponenten anhand der resultierenden Punktwolken. Da alle Komponenten bereits verbaut sind, ist eine Untersuchung einzelner Bestandteile und Sensoren nur eingeschränkt möglich. Daher sollte eine Aufnahme bei „idealen" Bedingungen verglichen werden mit Aufnahmen, die gezielt von außen beeinflusst wurden.

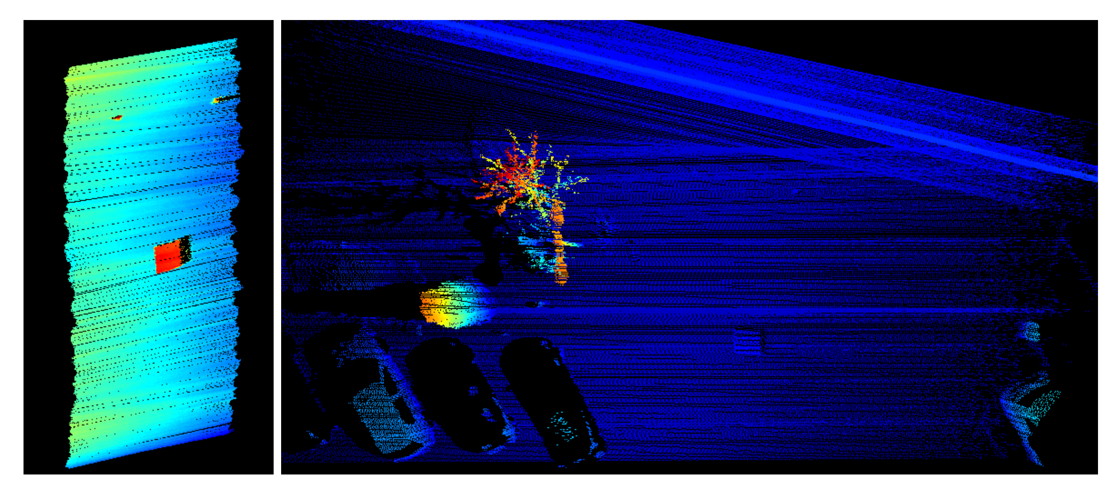
Untersuchungsablauf

Um eine Aufnahme der LEDA-K2 Drohne unter idealen Bedingungen zu realisieren, erfolgte die Aufnahme nicht durch einen ferngesteuerten Überflug, sondern zunächst durch eine handgeführte Aufnahme der Drohne. Mittels der manuellen Bewegung des Fluggerätes können Turbolenzen und plötzliche Richtungsänderungen während einer Aufnahme verhindert oder gezielt in eine bestimmte Richtung erzeugt werden. Als Testgebiet diente eine freie Betonpflasterfläche auf dem Firmenparkplatz der MILAN Geoservice GmbH. Auf der Freifläche wurde als geometrisches Objekt die Transportkiste der LEDA-K2 Drohne aufgestellt und die Positionen der Eckkanten per GNSS RTK-Messung absolut bestimmt. Die Maße der Transportkiste lauten 75 x 79 x 43 cm (B x L x H).

Insgesamt erfolgten sechs Aufnahmen durch die LEDA-K2 Drohne. Bei den ersten fünf wurde die Drohne handgeführt. Dabei war die erste Aufnahme ein Idealflug, bei dem die Drohne so ruhig wie möglich geführt wurde. In den folgenden vier Aufnahmen wurde die Drohne während der Handführung nacheinander im Roll- (Spur 2), Pitch- (Spur 3), Yaw-Winkel (Spur 4) und in der Höhe (Spur 5) verändert. Die sechste Aufnahme war ein Überflug in ca. 9 m Flughöhe und stellt den Normalfall einer Aufnahme dar. Für die aufgenommenen sechs Scanstreifen wurden die Punktwolken mittels dem Programm ‚SDC-Prog' berechnet.

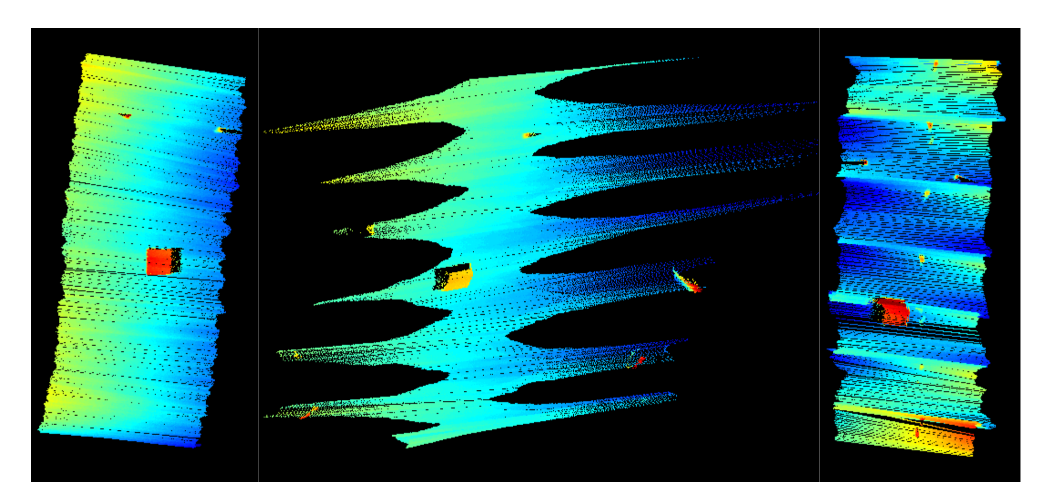
Ergebnisse

Die folgende Abbildung0 zeigt die Draufsicht auf die höhenfarbkodierten Punktwolken der ersten (stabile Handführung) und sechsten Spur (Überflug).

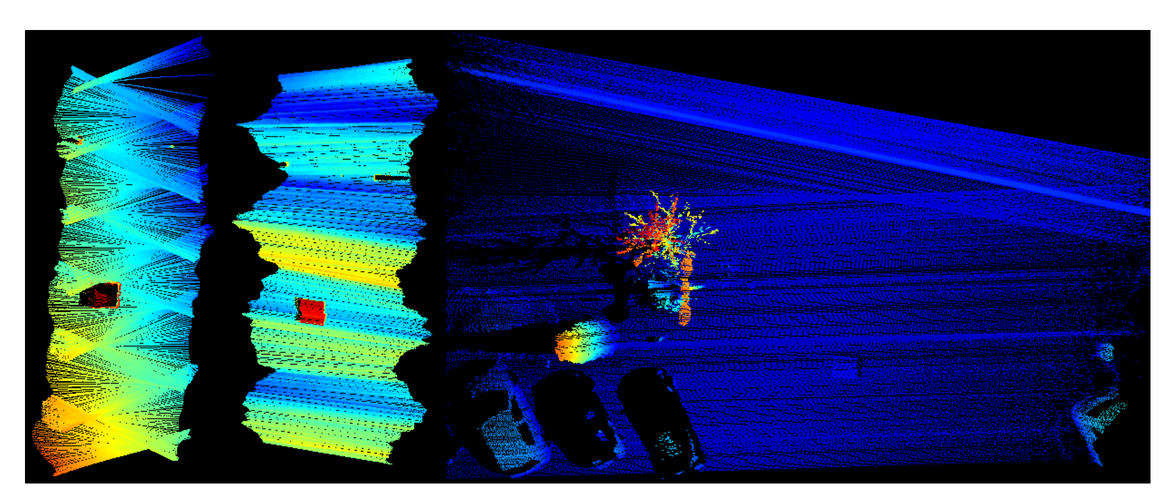


Draufsicht auf Punktwolken der ersten (links) und sechsten Spur (rechts)

Anhand der visualisierten Punktwolken konnte eine Verdrehung im Yaw-Winkel für jeden der Scanstreifen festgestellt werden. Dabei unterschied sich diese in jedem der Streifen. Vor der erneuten Berechnung der Daten musste demnach die Verdrehung für jede Spur separat ermittelt und angebracht werden. Die erneut berechneten Punktwolken sind in den folgenden zwei Abbildungen dargestellt.



Draufsicht auf Punktwolke der ersten, zweiten und dritten Spur (v.l.n.r.)



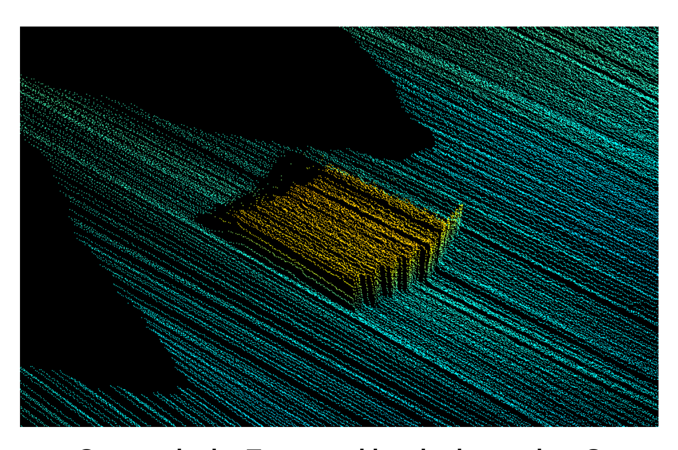
Draufsicht auf Punktwolke der vierten, fünften und sechsten Spur (v.l.n.r.)

Die Punktwolke der sechsten Spur wies eine Punktdichte bis zu 1000 Punkte pro m² auf. Die Punktdichte variiert und nimmt von der Mitte der Spur nach außen hin ab. Weiterhin wurden die Maße der Kiste in jedem Scan abgegriffen. Die abgegriffenen Maße für die einzelnen Spuren und die Abweichungen von den Sollmaßen können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Abweichungen der Spuren von den Kistenmaßen

Spur	Breite [cm]	∆ [cm]	Länge [cm]	∆ [cm]	Höhe [cm]	∆ [cm]
Kistenmaße	75,0	0,0	79,0	0,0	43,0	0,0
Spur 1	76,2	+1,2	79,1	+0,1	43,6	+0,6
Spur 2	75,6	+0,6	78,3	-0,7	42,9	-0,1
Spur 3	76,7	+1,7	83,7	+4,7	43,3	+0,3
Spur 4	75,5	+0,5	82,0	+3,0	40,9	-2,1
Spur 5	76,2	+1,2	77,2	-1,8	43,9	+0,9
Spur 6	70,9	-4,1	77,3	-1,7	43,5	+0,5

Die Abweichungen der Kistenmaße in den Scanstreifen fallen mit maximal 4,1 cm in der Breite (Spur 6), 4,7 cm in der Länge (Spur 3) und 2,1 cm in der Höhe (Spur 4) vergleichsweise gering aus. Die Geometrie der Kiste wird in den Scansteifen, bei denen die Drohne in Roll-, Pitch-, Yaw-Winkel oder der Höhe verändert wurde, mitunter stark verzerrt und damit schlecht wiedergegeben. Die Seiten der Kiste verlaufen dabei zumeist weder gerade noch rechtwinklig zueinander. Beispielhaft dafür ist in der folgenden Abbildung die in der zweiten Spur dargestellte Kiste zu sehen, bei der die Drohne stark im Roll-Winkel verändert wurde.



Geometrie der Transportkiste in der zweiten Spur

Im Folgenden werden die Abweichungen der aufgenommenen Transportkiste von den absoluten Positionen der Eckpunkte ermittelt. Dabei reichen drei Eckpunkte aus, um die Lageabweichung und Verschwenkung der Kiste festzustellen. Die Verschwenkungen der Kiste werden für zwei annähernd zueinander rechtwinklige Seiten berechnet.

Positionsaobweichungen zum Referenzobjekt

Aufnahme	Eckpunkt	X-Offset [m]	Y-Offset [m]	Lage-offset [m]	Höhen-offset [m]	Richtungswinkel der Seiten [°]	
RTK-Aufnahme	-	-	-	-	-	Nord-Seite Ost-Seite	93,881 183,389
Spur 1	1 2 3	1,372 1,385 1,385	0,997 0,972 1,022	1,696 1,692 1,721	-6,689 -6,654 -6,651	Nord-Seite Ost-Seite	93,044 179,537
Spur 2	1 2 3	0,835 0,764 0,765	1,303 1,281 1,445	1,548 1,492 1,635	-6,835 -6,723 -6,722	Nord-Seite Ost-Seite	99,174 170,813
Spur 3	1 2 3	1,025 1,154 1,156	1,154 1,208 1,169	1,543 1,671 1,644	-6,543 -6,590 -6,619	Nord-Seite Ost-Seite	84,958 186,391
Spur 4	1 2 3	0,696 0,661 0,634	1,363 1,388 1,421	1,530 1,537 1,556	-6,388 -6,393 -6,336	Nord-Seite Ost-Seite	96,187 180,819
Spur 5	1 2 3	1,072 1,111 1,130	1,002 0,976 0,934	1,467 1,479 1,466	-6,835 -6,859 -6,864	Nord-Seite Ost-Seite	91,116 186,774
Spur 6	1 2 3	1,082 1,106 1,111	1,218 1,087 1,080	1,629 1,551 1,549	-6,519 -6,528 -6,532	Nord-Seite Ost-Seite	92,583 183,953

Alle Spuren weisen gleichermaßen eine absolute Lageabweichung von 1 bis 2 m auf. Dies spiegelt die in Kap. 4.2 nachgewiesene Genauigkeit der GPS-Einheit wieder. Der Unterschied von 6 bis 7 m in der Höhe trat auch in dieser Untersuchung auf. Jedoch unterscheiden sich die drei Punkte innerhalb der Scanstreifen in Spur 1 am geringsten. Bei den Spuren 2 bis 5 dagegen hatten die künstlich herbeigeführten Einwirkungen in sichtbarem Maße Einfluss auf die Ergebnisse. Auch bei der Spur 6, die den Normalfall wiederspiegelt, fallen die Differenzen zwischen den Eckpunkten höher aus. Dies wird aber dadurch verstärkt, dass die Aufnahme der LEDA-K2 Drohne aus größerer Höhe stattfand und demnach die Kiste durch weniger Abtastungen erfasst wurde. Die Genauigkeit, mit der eine Ecke identifiziert werden kann, nimmt damit ab. Des Weiteren weisen die Punkte der Spuren 1 und 6 die geringsten Abweichungen in der Ausrichtung der Kiste auf.

Da sich alle Spuren in ihrer absoluten Position unterscheiden, ist eine manuelle oder automatische Spuranpassung zur Vereinigung der Scans notwendig.

Um weiter festzustellen, wie genau die Drohne eine ebene Fläche unter den genannten Einwirkungen (Spur 2 bis 5) sowie unter idealen (Spur 1) und normalen, üblichen Bedingungen (Spur 6) erfassen kann, wird für einen kleinen ebenen Bereich (ca. 3,26 x 3,41 m) für jede Spur die ausgleichende Ebene berechnet. Anhand der Abstände jedes 3D-Punktes von der berechneten Ebene konnten Standardabweichungen als Indikator für die Punktstreuung ermittelt werden. Die Ergebnisse können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Standardabweichungen der Punktwolken von der ausgleichenden Ebene

Spur	Std-abw. der Punkte von der Ebene [m]	Anzahl der Punkte
Spur 1	0,012	60257
Spur 2	0,020	77747
Spur 3	0,042	65361
Spur 4	0,024	75862
Spur 5	0,076	66713
Spur 6	0,027	11607

Wie zu erwarten, weist die Messung unter idealen Bedingungen (Spur 1) mit 12 mm die geringste Standardabweichung auf. Am schlechtesten beschreibt die Spur 5, bei der das Fluggerät während der Aufnahme in der Höhe verändert wurde, eine ebene Fläche. Dabei ist die Genauigkeit mehr als sechsmal schlechter im Vergleich zur Spur 1. Die Aufnahme aus 9 m Höhe dagegen ist nur zwei- bis dreimal ungenauer bei der Erfassung einer ebenen Fläche. Veränderungen im Yaw- und Roll-Winkel wirkten sich ebenfalls nur geringfügig aus. Lediglich Veränderungen in der Pitch-Achse verschlechterten die Genauigkeit der aufgenommen Fläche um das drei- bis vierfache.

Fazit

Beim Zusammenspiel der einzelnen Komponenten konnte zunächst festgestellt werden, dass eine individuelle Anpassung des Yaw-Winkel für jeden Streifen im Laufe der Punktberechnung notwendig ist. Insgesamt lässt sich jedoch sagen, dass die IMU- und die GPS-Einheit die Schwachstelle der Drohnenkonstruktion darstellen. Schnelle und starke Veränderungen in den Orientierungswinkeln und/oder der dreidimensionalen Lage werden nicht mit der nötigen Aktualisierungsrate durch die Sensoren erfasst und Oberflächen werden dadurch ca. 2- bis 6-mal schlechter abgebildet. Jedoch stellen die künstlich hervorgerufenen Veränderungen extreme Verhältnisse dar. Ein Überflug bei normalen Bedingungen hat gezeigt, dass die Konstruktion durchaus dazu in der Lage ist, ein Abbild der Erdoberfläche als Punktwolke geometrisch korrekt mit einer relativen Genauigkeit innerhalb des Streifens besser als 3 cm aufzunehmen. Bisweilen müssen mehrere zusammengehörende Spuren im Nachhinein noch automatisch bzw. manuell zueinander in der Lage und Orientierung angepasst werden.

Vergleich der Punktwolken mit ALS-Messungen

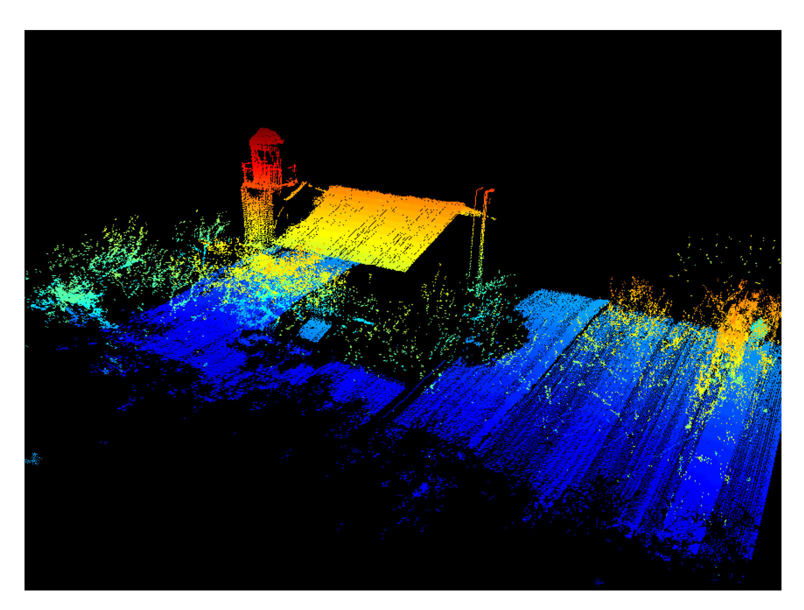
Das Untersuchungsgebiet ist ein Küstenabschnitt von Wustrow, Ortsteil Dierhagen-Ost auf der Ostseehalbinsel Fischland-Darß-Zingst im Norden von Mecklenburg-Vorpommern. Hier befindet sich ein Leuchtturm, der als Vergleichsobjekt dienen sollte.

Die Aufnahme des Leuchtturms und der umliegenden Grünflächen erfolgte durch zwei Flugstreifen entlang der Küste und vier in Querrichtung durch halbautomatische Steuerung der LEDA-K2-Drohne.



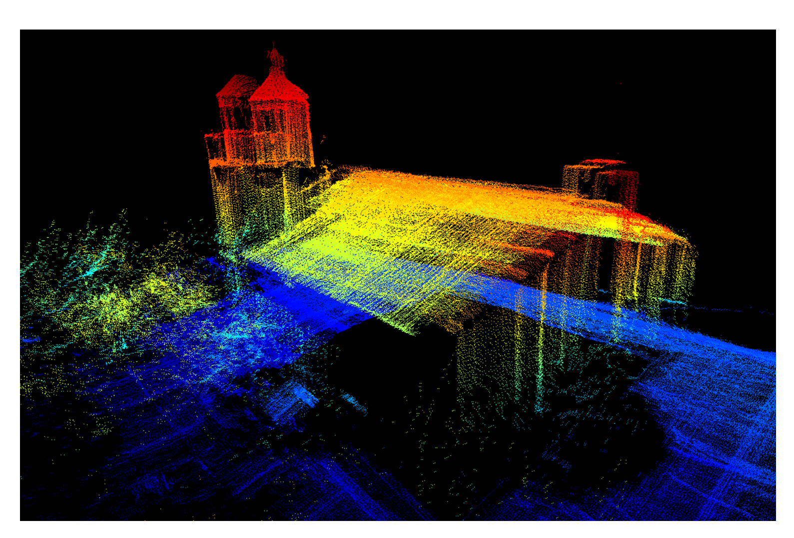
Aufnahmegeometrie der LEDA-K2-Messung

Die erhaltenen RAW-Dateien wurden in sdc-Dateien umgewandelt. Anschließend wurden mithilfe des Programms ‚SDC-Prog‘ 3D-Punkte als UTM-Koordinaten errechnet und als Punktdateien für jeden Streifen ausgegeben. Zur besseren Übersicht wurden die Streifen entsprechend ihrer Aufnahmereihenfolge in ‚Spur 1‘ bis ‚Spur 6‘ umbenannt. Als Ergebnis einer einzelnen Spur ist in der folgenden Abbildung exemplarisch die Spur 2 dargestellt.

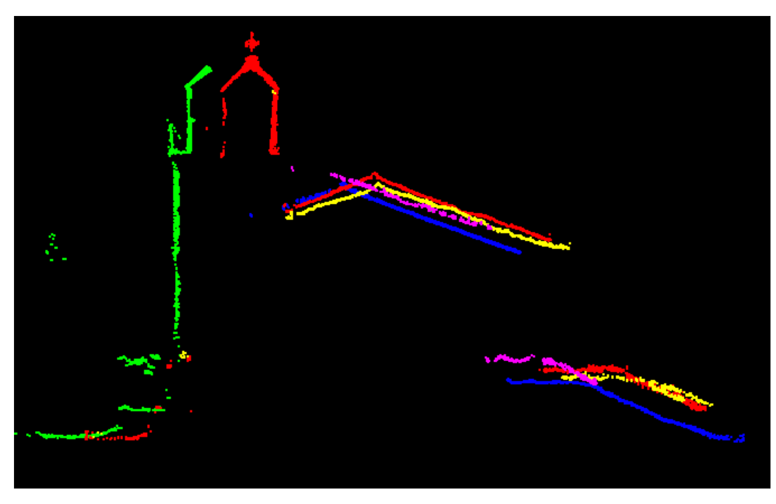


Punktwolke der Spur 2

Eine Spuranpassung durch die Auswertealgorithmen der MILAN Geoservice GmbH war nicht erfolgreich. Grund dafür könnte das Vorhandensein von zu wenigen geneigten Ebenen sein, die für eine Anpassung der Spuren relativ zueinander benötigt werden. Des Weiteren sind alle Parameter in dem ‚SDC-Prog‘ für das herkömmliche ALS optimiert. Wie schon in Kap. 4.4.2 gezeigt, wiesen auch hierbei alle Messungen Verdrehungen im Roll-, Pitch- und Yaw-Winkel auf. Die folgenden Abbildungen zeigen alle Spuren unangepasst.



Punktwolke aller Spuren



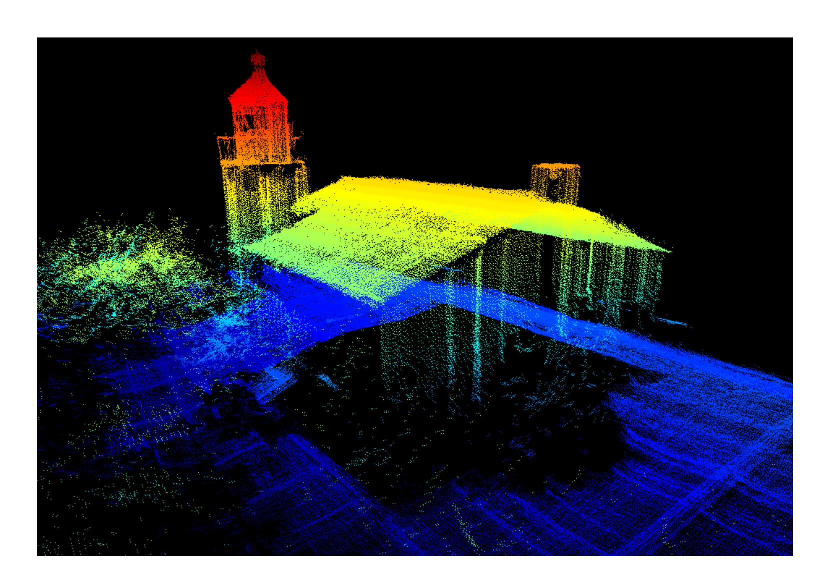
Querschnitt durch die Punktwolke aller Spuren

Die geometrischen Abweichungen der Scanstreifen untereinander betrug bis zu 1,5 m. Anstelle einer automatischen Spuranpassung erfolgten daher an dieser Stelle zunächst für jede Spur eine manuelle Anpassung der Orientierungswinkel vor erneuter Berechnung und anschließend eine Verschiebung. Dabei wurde die Spur 2 als fest angenommen und lediglich im Kurswinkel korrigiert. Die übrigen Spuren wurden an diese angepasst, um eine Gesamtpunktwolke zu erhalten. Die Spur 1 wurde keiner Anpassung unterzogen, da geometrische Formen innerhalb der Punktwolke zu große Unstetigkeiten aufwiesen, was der unzureichend genauen GPS- und IMU-Einheit geschuldet ist. Die folgende Tabelle listet sowohl die Translationen als auch Winkelkorrekturen der angepassten Spuren zur Referenzspur auf.

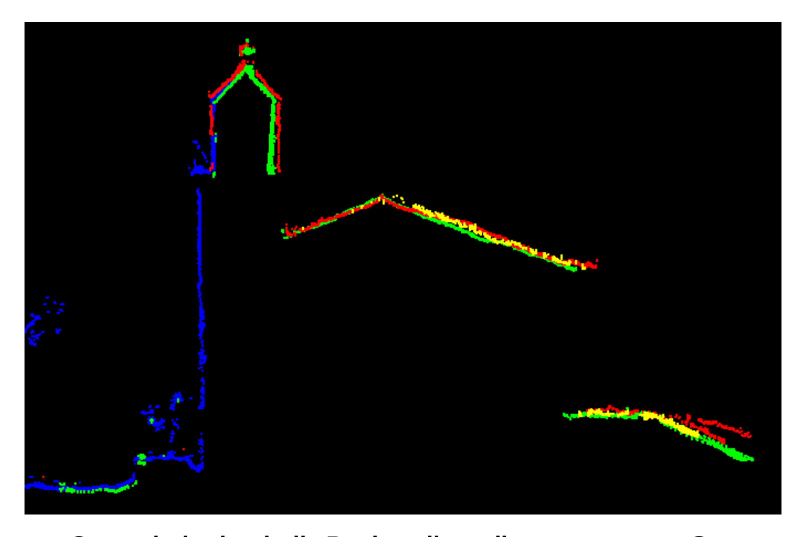
Anpassung der Spur 3 bis Spur 6 an Spur 2

Spur	Korrektur Yaw [°]	Korrektur Roll [°]	Korrektur Pitch [°]	Translation in X [m]	Translation in Y [m]	Translation in Z [m]
Spur 1	-	-	-	-	-	-
Spur 2	4,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000
Spur 3	2,75	0,00	0,00	-0,950	0,130	0,000
Spur 4	-9,00	-3,00	0,00	-0,180	0,000	0,000
Spur 5	8,00	0,00	0,00	-0,220	0,150	-0,300
Spur 6	-5,00	-1,00	0,00	-0,110	0,140	-0,120

Die folgenden Abbildungen zeigen alle Spuren in einer Ansicht nach der manuellen Anpassung.

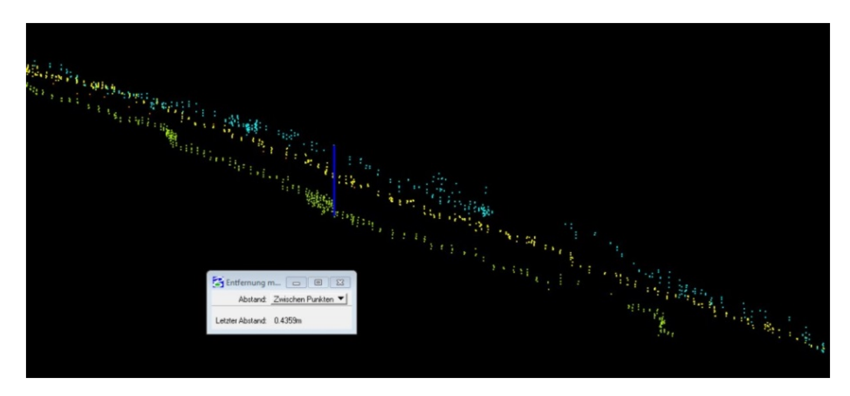


Punktwolke aller angepassten **Spuren**



Querschnitt durch die Punktwolken aller angepassten Spuren

Nach der Anpassung wies die Gesamtpunktwolke eine Punktdichte von bis zu 2000 Punkten pro m² auf. Des Weiteren treten größere Abweichungen (bis zu 0,5 m) zwischen den Spuren nur noch an Randbereichen einzelner Spuren auf. Dies ist zum einen zurückzuführen auf beispielsweise ungünstige Auftreffwinkel der Laserstrahlen. Schräge Dachflächen mit dunkler Oberfläche begünstigen diesen Fall noch weiter. Zum anderen existieren zudem noch Reste der GPS- und IMU-Ungenauigkeiten.

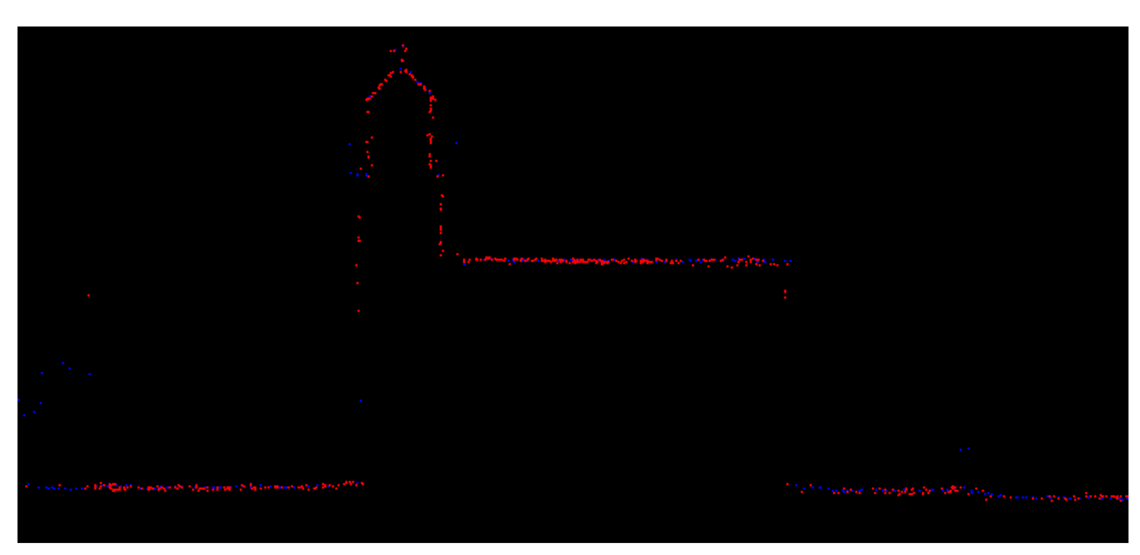


Maximale Abweichungen nach manueller Spuranpassung

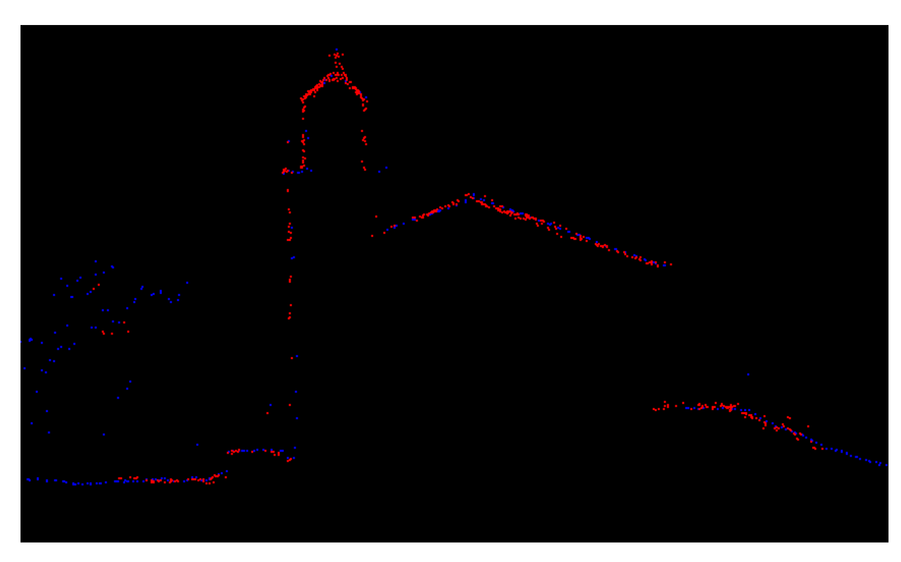
Da die Georeferenzierung durch die GPS-Einheit nur eine absolute Genauigkeit von wenigen Metern aufweist, musste die LEDA-K2-Punktwolke daher noch an die Daten der ALS-Messung angepasst werden. Die Punktwolke wurde in x, y und z um die folgenden Werte verschoben:

Translation in X: -0,830 m
Translation in Y: -0,730 m
Translation in Z: 7,700 m

Nach der Anpassung der LEDA-K2- an die ALS-Daten konnten diese miteinander verglichen werden. Die folgenden beiden Abbildungen zeigen den Vergleich zwischen ALS-Daten (blaue Punkte) und Daten aus der Drohnenbefliegung (rote Punkte - stark ausgedünnt).



Längsschnitt durch ALS- (blau) und LEDA-K2-Daten (rot)



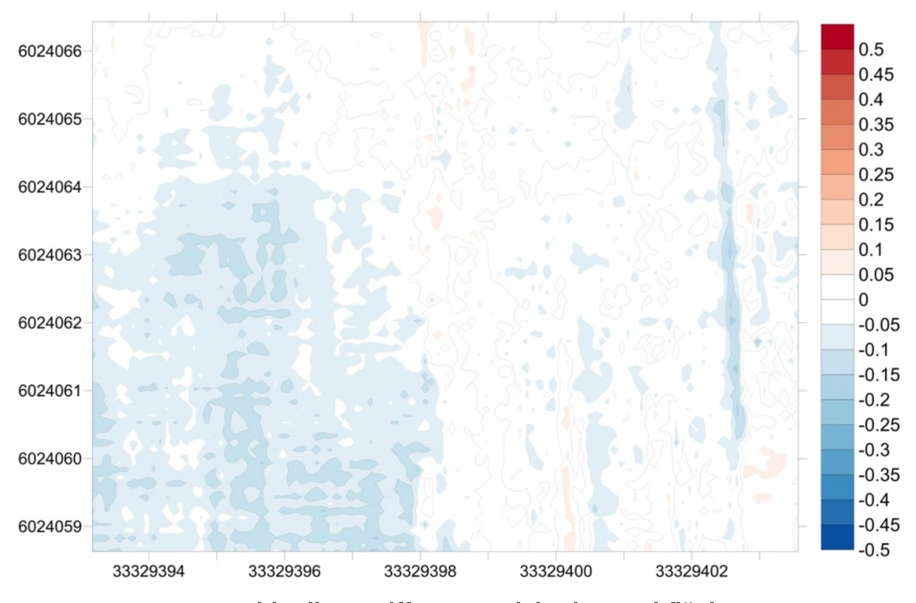
Querschnitt durch ALS- (blau) und LEDA-K2-Daten (rot)

Um die Unterschiede zwischen den ALS- und Drohnenpunkten sowohl optisch als auch nummerisch darstellen zu können, wurden mithilfe der Software Surfer Differenzbilder und Differenzkenngrößen berechnet. Dazu mussten alle Punkte, die zu variablen Objekten wie Sträucher oder Bäume zu zählen sind, extrahiert werden. Anschließend wurden die Daten jeweils in einem regelmäßigen Raster von 0,1 m für die Berechnung ausgegeben. Durch das Überstehen des Daches über dem Boden ergaben sich an diesen Stellen Mischwerte, worauf eine Differenzbildung nicht über das gesamte Aufnahmegebiet erfolgte, sondern in drei kleinen Teilgebieten (grüne Rahmen).

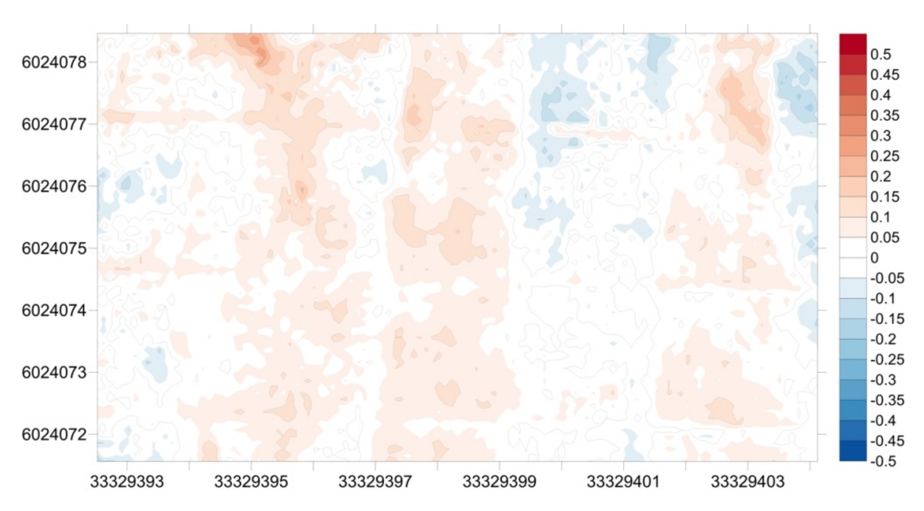


Untersuchungsgebiete für die Differenzbildung

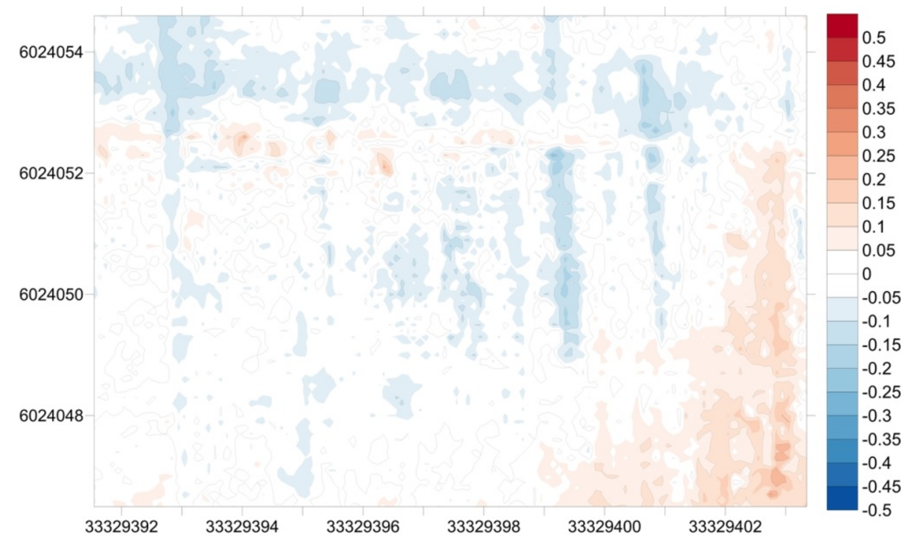
Um die Abweichung der LEDA-K2-Daten von denen des ALS zu erhalten, wurden die ALS-Raster von den LEDA-K2-Rastern subtrahiert. Dadurch entstand pro Teilgebiet ein neues Raster mit Differenzwerten. Diese wurden mit dem Programm Surfer farbkodiert und für alle Teilgebiete in den folgenden drei Abbildungen grafisch dargestellt.



Farbkodierte Differenzansicht der Dachfläche



Farbkodierte Differenzansicht der Wiesenfläche 1



Farbkodierte Differenzansicht der Wiesenfläche 2

Weiterhin wurden mithilfe der Software Surfer anhand der erzeugten Differenzraster Volumen und statistische Größen errechnet. Die Werte für die drei Teilgebiete können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Volumen- und statistische Werte der drei Teilgebiete

Kenngröße	Teilgebiet Dach	Teilgebiet Wiese 1	Teilgebiet Wiese 2
Positives Volumen [m³]	0,3356	3,2902	1,6117
Negatives Volumen [m³]	-3,1495	-0,7315	-2,5000
Nettovolumen [m³]	-2,8139	2,5587	-0,8883
Standardabweichung [m]	0,043	0,056	0,058
Mittelwert [m]	-0,035	0,031	-0,009
Minimum [m]	-0,186	-0,176	-0,229
Maximum [m]	0,111	0,285	0,282

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass bei dem Dach und dem Wiesengebiet 1 ein erheblich großes Differenzvolumen auftritt. Das liegt zum einen daran, dass jedes Testgebiet aus Punkten verschiedener Spuren besteht und zum anderen liefert die manuelle Anpassung bei weitem keine so genaue Angleichung der Spuren wie eine automatische rechnergestützte Anpassung. Doch die Ergebnisse zeigen auch, dass bei Mittelwerten von 35 mm oder weniger sowie zugehörigen Standardabweichungen von 58 mm oder weniger eine gute Übereinstimmung mit den ALS-Daten vorliegt.

Fazit

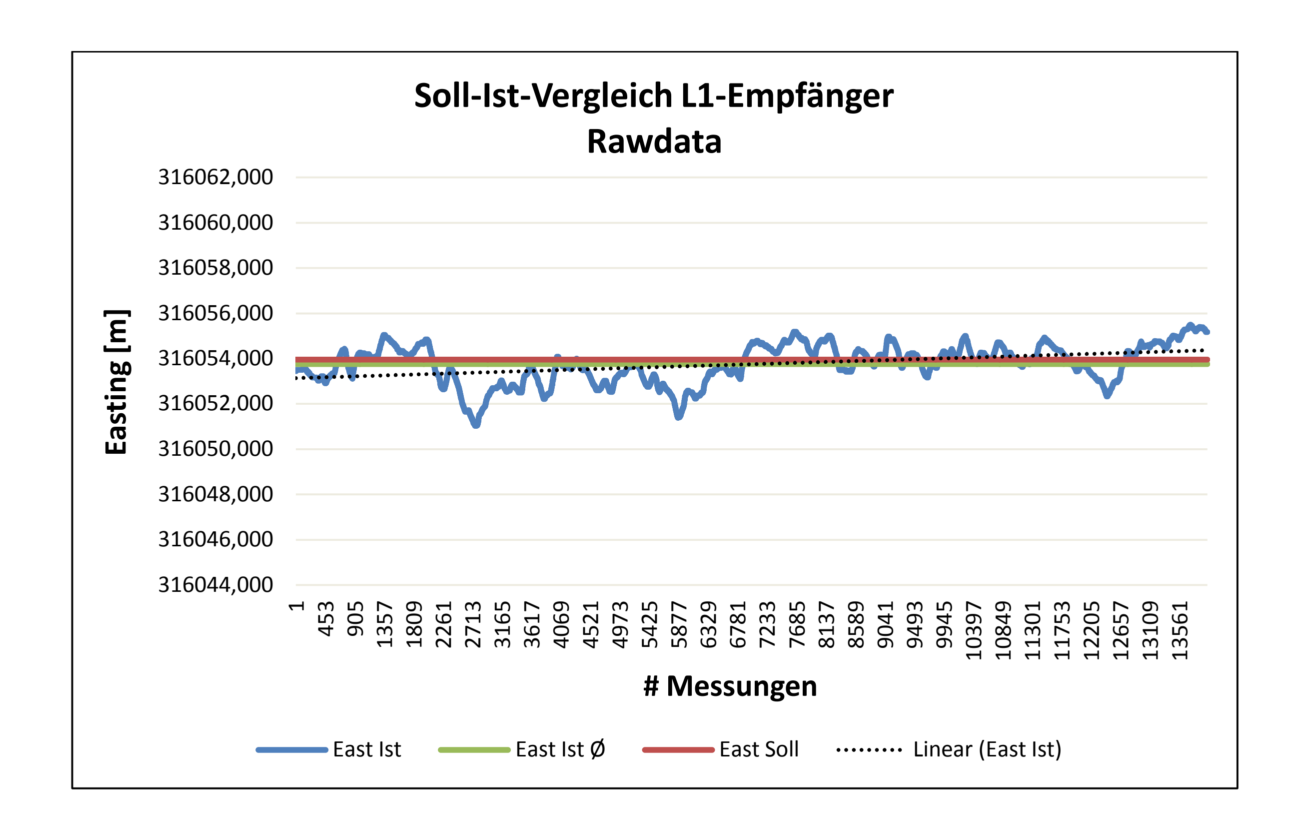
Um die durch die Drohnensysteme erhaltenen Daten vergleichen zu können, müssen diese zueinander manuell angepasst werden. Zudem muss eine absolute Anpassung an Referenzmessungen erfolgen. Ein automatisches Auswerten der Daten ist demnach noch nicht möglich. Jedoch könnten verschiedene Aufnahmen eines Drohnensystems relativ zueinander oder als ergänzende Aufnahmen zu ALS-Messungen bereits zu diesem Zeitpunkt Anwendung finden.

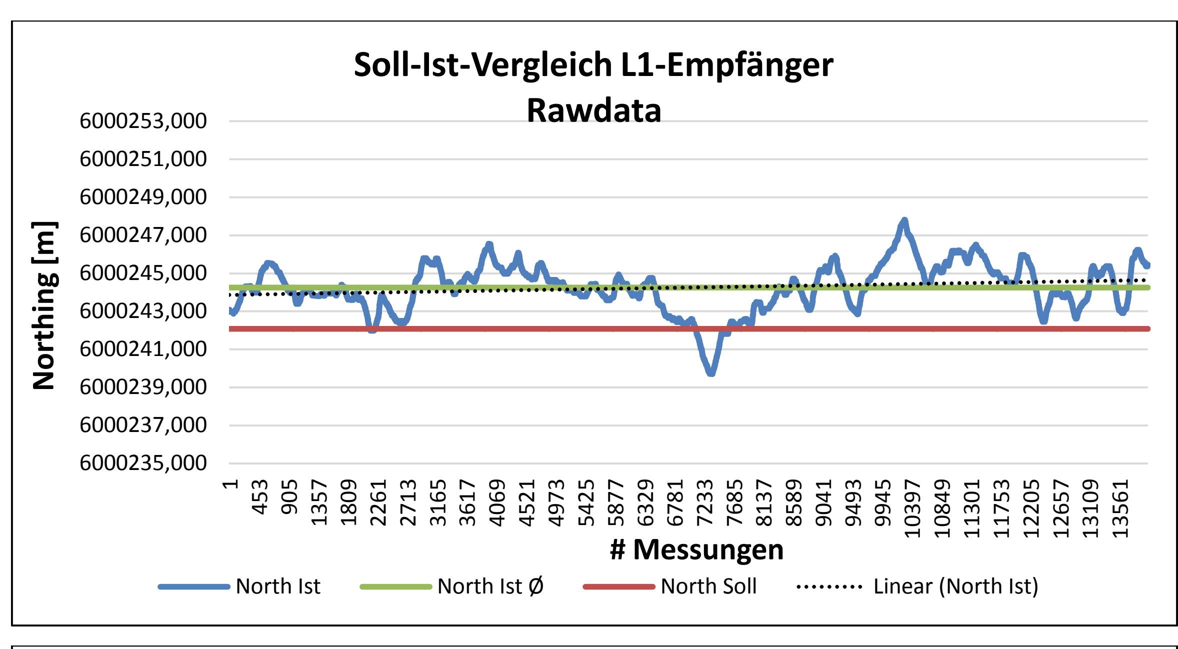
Anpassungen

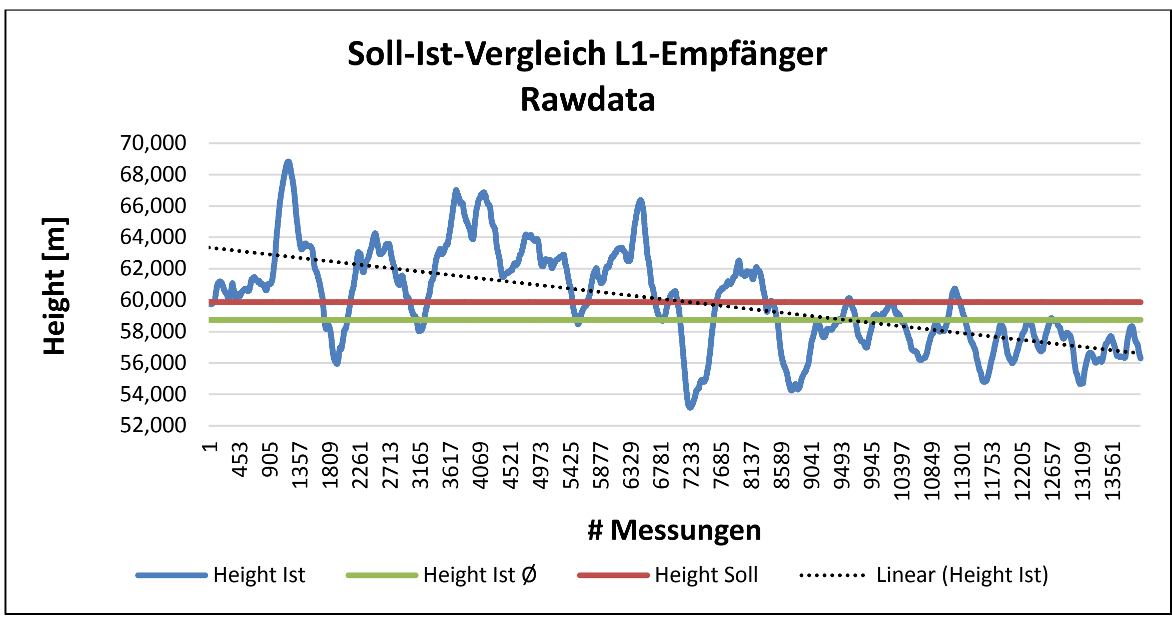
Im Laufe des Projektzeitraumes wurde die Drohne so modifiziert dass von den Motoren ausgehende Vibrationen möglichst gering gehalten werden. Einerseits wurden neue Typen verwendet, die bedeutend ruhiger laufen. Andererseits kamen Materialien an den Armen und

Verbindungselementen zum Einsatz, die vibrationsdämpfende Eigenschaften aufweisen. Dies soll den negativen Einflüssen der Vibrationen auf die IMU-Werte entgegenwirken.
Bei der GPS-Einheit wurde ein Modell eingebaut, welches eine Rohdatenaufzeichnung erlaubt. Dies ermöglicht eine Korrektur der Positionen mit SAPOS-Korrekturdaten im post-processing.
Um die Genauigkeit der Einheit abzuschätzen wurden zunächst statische Tests vorgenommen. Dabei wurde ein Punkt tachymetrisch bestimmt. Auf diesem wurde die Antenne positioniert und ca. 40 min Rohdaten aufgezeichnet. Die Positionsdaten ohne Korrektur sind in den folgenden drei Grafiken dargestellt.

	Easting	Northing	Height
	[m]	[m]	[m]
Ist	316053,753	6000244,252	58,738
Std.-abw.	0,868	1,287	3,108
Soll	316053,956	6000242,085	59,871
Differenz	0,203	-2,167	1,133

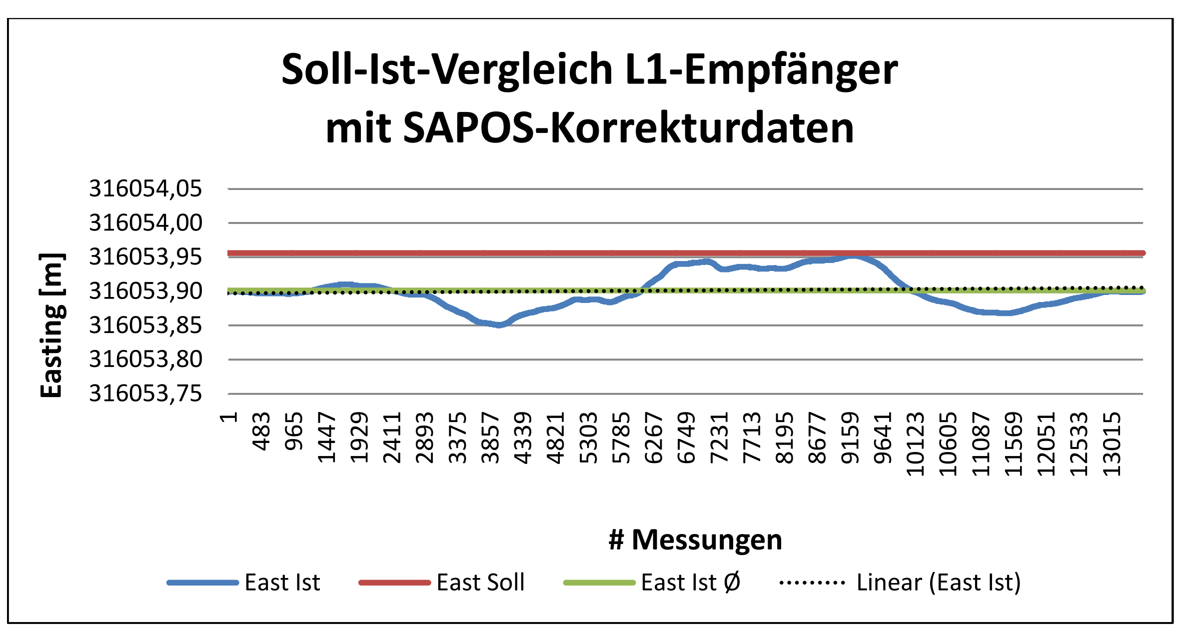


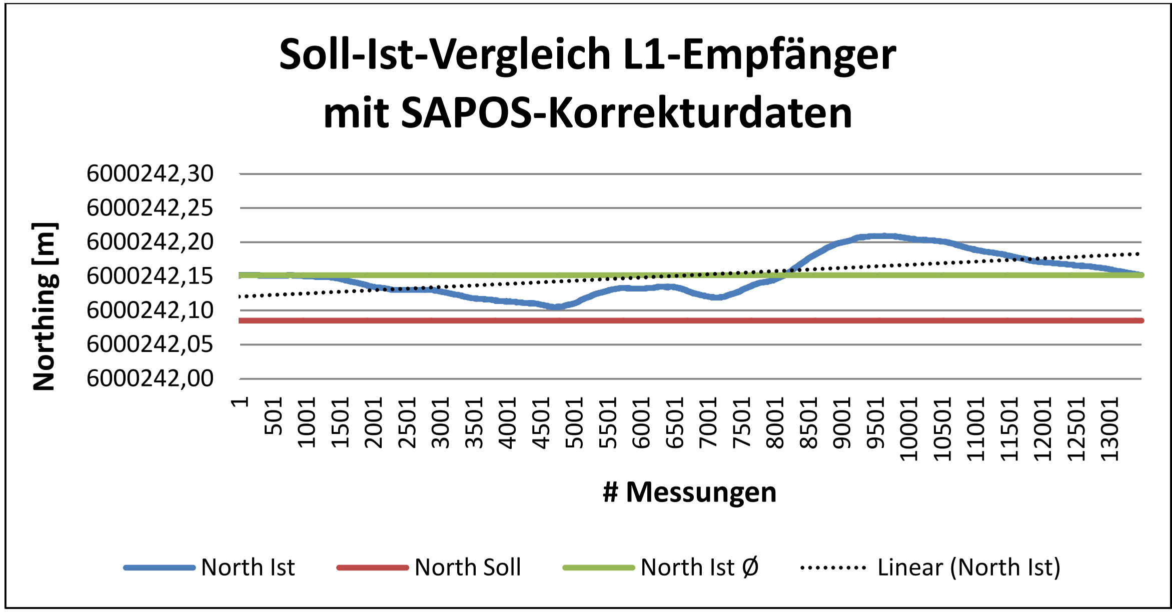


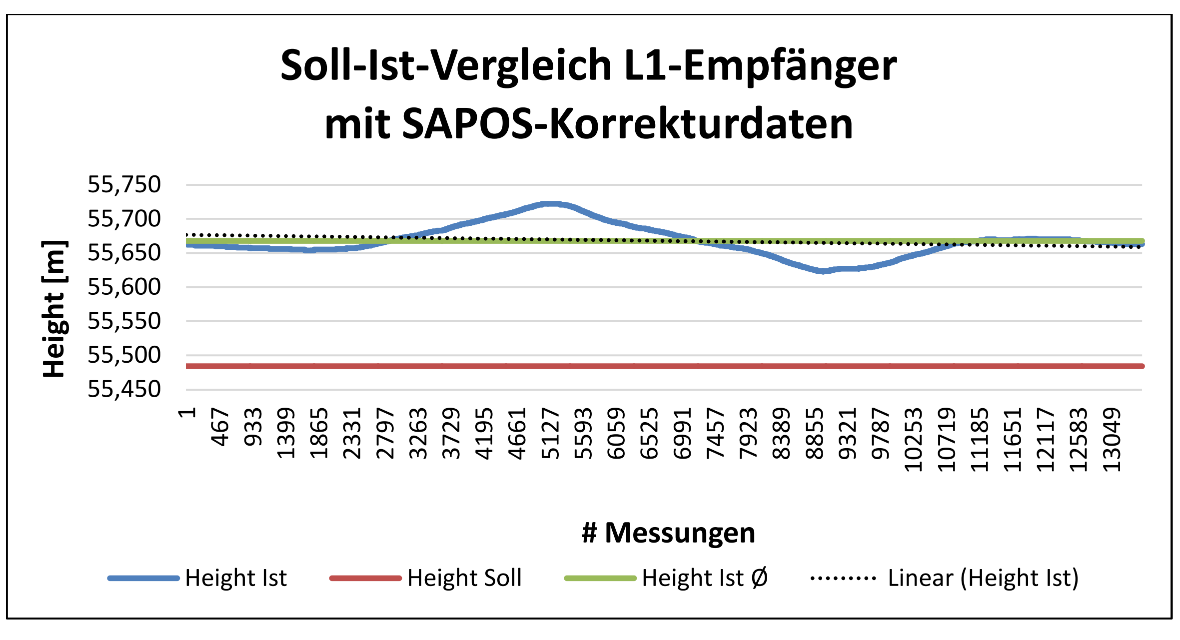


Die aufgezeichneten Rohdaten wurden mit SAPOS-Korrekturdaten angepasst und zeigten folgende Ergebnisse.

	Easting	Northing	Height
	[m]	[m]	[m]
Ist	316053,901	6000242,152	55,668
Std.-abw.	0,026	0,030	0,024
Soll	316053,956	6000242,085	59,871
Differenz	0,055	-0,067	-0,184


Soll-Ist-Vergleich L1-Empfänger
mit SAPOS-Korrekturdaten
Easting [m]
316054,05
316054,00
316053,95
316053,90
316053,85
316053,80
316053,75
Messungen
East Ist
East Soll
East Ist Ø
Linear (East Ist)


Soll-Ist-Vergleich L1-Empfänger
mit SAPOS-Korrekturdaten
Northing [m]
6000242,30
6000242,25
6000242,20
6000242,15
6000242,10
6000242,05
6000242,00
Messungen
North Ist
North Soll
North Ist Ø
Linear (North Ist)


Soll-Ist-Vergleich L1-Empfänger
mit SAPOS-Korrekturdaten
Height [m]
55,750
55,700
55,650
55,600
55,550
55,500
55,450
Messungen
Height Ist
Height Soll
Height Ist Ø
Linear (Height Ist)

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die SAPOS-Anpassung absolute Genauigkeiten erreicht werden können, die im Bereich der gesetzten Ziele liegen.

Ausblick

Die Aufzeichnung der Rohdaten auf dem Pandaboard ist der nächste Schritt beim Aufbau des ALS-Flugroboters. Hier gehört ebenso die Übermittlung und Speicherung des GPS-Zeitstempels um die Daten im post-processing miteinander zu verbinden.
Zudem ist angedacht ein leistungsfähigere IMU direkt an den Laserscanner zu befestigen. Somit sollen nicht nur Vibrationen entgegengewirkt, sondern auch die Einflüssen von Leverarm- und Boresightwinkel-Fehlern verringert werden. Auch hier müssen Synchronisationsarbeiten vorgenommen werden.

7. Die Software EDA-K

Programmübersicht und Allgemeine Funktionalität

Das Programm “EDA-K – Einsatz von Drohnen zur Aufnahme von Küstengebieten“ ist ein von der CiS GmbH entwickeltes Geographisches Informationssystem (GIS). Es enthält spezielle Funktionen zur Arbeit mit Luftbildern, die z.B. bei einer Befliegung mit unbemannten Flugsystemen (Unmanned Aerial Vehicles (UAV)) entstehen sowie Funktionen zur Auswertung von 3D-Modellen, die aus diesen Luftaufnahmen abgeleitet werden können.
Neben diesen Spezialfunktionen enthält das Programm GIS Funktionen zum Im- und Export von geographischen Datensätzen, zur Koordinatentransformation sowie zum Erzeugen von Geometrischen Objekten und die Verknüpfung mit bzw. Abfrage und Bearbeitung von Sachdaten. Weiterhin besteht die Möglichkeit Daten von WebMapServices (WMS) zu beziehen, um sich so eine Hintergrundkarte anzeigen zu lassen (z.B. amtliche Luftbilder, topographische Karten etc.).

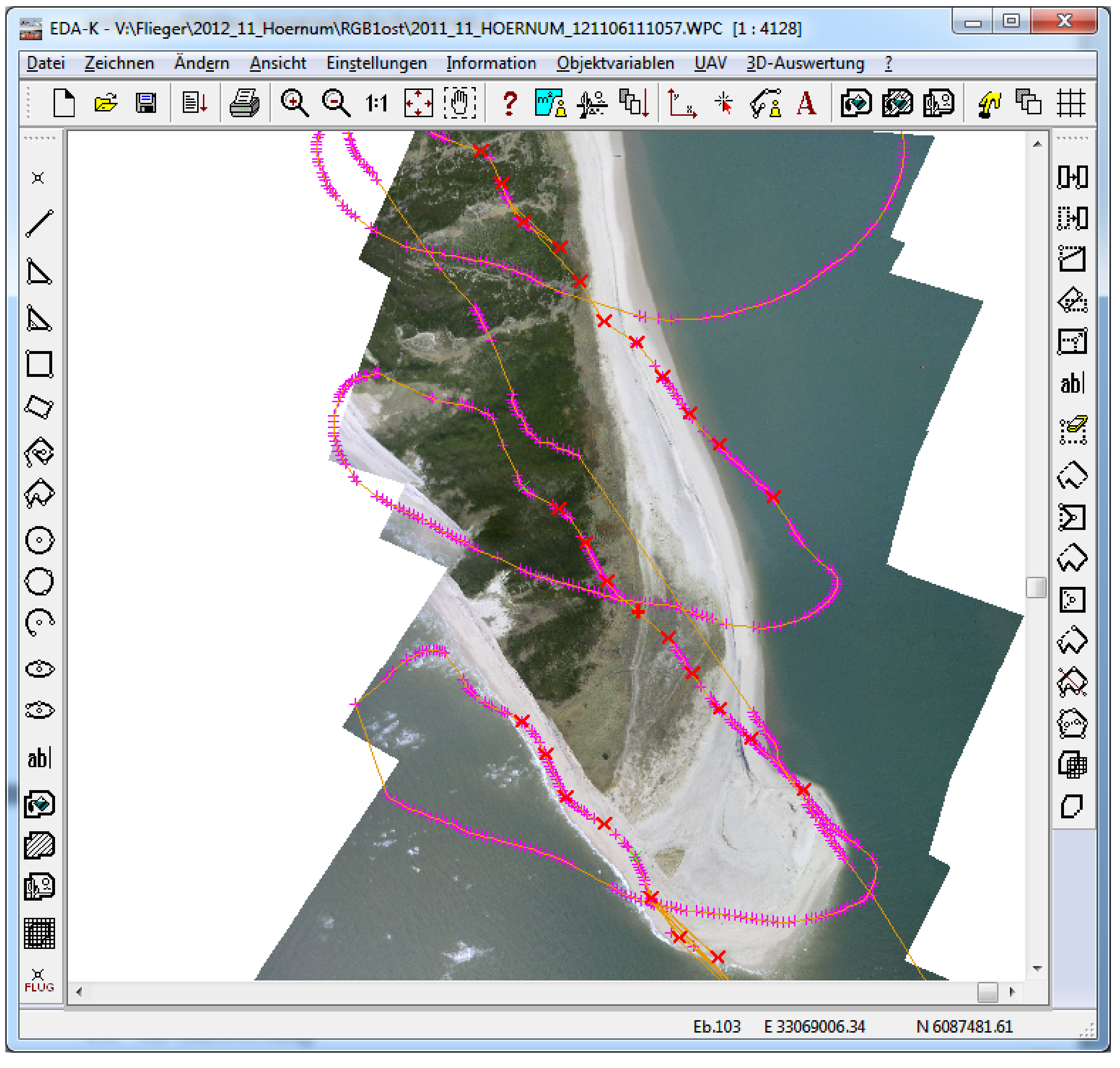
UAV-Funktionalität

Unter dem Menüpunkt „UAV“ sind alle wichtigen Funktionen zur Arbeit mit den UAV Daten zusammengefasst. Zunächst sollte man im entsprechenden Untermenü die Voreinstellungen prüfen und insbesondere die für den aktuellen Flug verwendete Kamera samt Kalibrierung einstellen oder auswählen.
Danach kann ein Flugprotokoll eingelesen werden. Dieses Protokoll enthält eine Aufzeichnung des vom Fluggerät zurückgelegten Weges sowie die Punktpositionen, an denen die Kamera eine Aufnahme erstellt hat.

Diesen Fotopunkten werden beim Einlesen mehrere Objektvariablen zugeordnet, in denen unter anderem die Dateinamen der Fotodatei und die aufgezeichneten Flugwinkel gespeichert sind. Diese Werte können dazu verwendet werden, die Bilder perspektivisch und in Flugrichtung gedreht anzuzeigen.

Weiterhin kann aus den Einzelnen Aufnahmen ein Bildmosaik erstellt werden, so dass man eine flächendeckende Gesamtaufnahme des beflogenen Gebietes erhält. Zu diesem Zweck müssen noch die zu verwendenden Flugpunkte ausgewählt werden (entweder manuell oder automatisch über die Flughöhe und Flugwinkel), um ein möglichst gutes Gesamtergebnis zu erhalten.

Eine weitere Funktion, die hier im Hinblick auf die 3D-Auswertung erwähnt werden muss, ist die Möglichkeit, die EXIF-Informationen der Fotodateien um die räumliche Lage (GPS-Positionen) zu erweitern. Dies kann dazu genutzt werden, bei der Erstellung der 3D-Modelle bessere Ergebnisse zu erzielen und von vornherein eine genauere Platzierung der Modelle zu erreichen.



Oberfläche von EDA-K mit geladenem Flugprotokoll und Bildmosaik einer Befliegung der Südspitze von Sylt

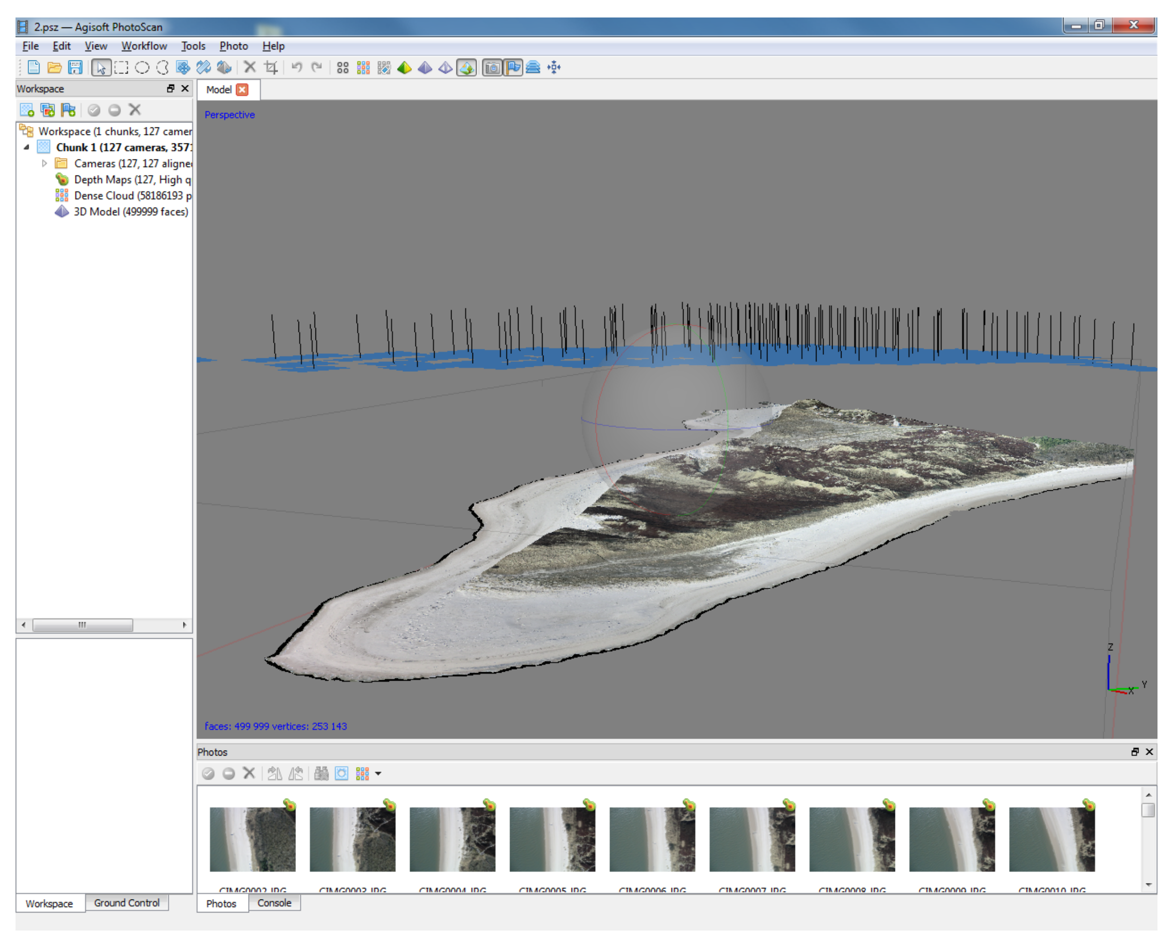
3D-Auswertung

Erzeugung der 3D-Modelle

Die Erzeugung der 3D-Modelle wird nicht innerhalb von EDA-K durchgeführt. Stattdessen ist hierfür ein externes Programm notwendig, dessen Ausgabe wieder in EDA-K eingelesen wird. Ein Beispiel für so ein Programm ist „PhotoScan“ von Agisoft.

„PhotoScan“ importiert dabei die aufgenommenen Luftbilder und durchläuft anschließend eine Photogrammetrische Auswertung an deren Ende ein 3D-Modell entsteht. Dieses 3D-Modell kann dann als VRML-Datei exportiert und in EDA-K importiert werden. Sofern eine Textur als „Ortophoto“ erzeugt wurde, kann diese dabei ebenfalls exportiert und in EDA-K als Orientierungshilfe verwendet werden.

„PhotoScan“ erlaubt in der der „Professional Edition“ zur Steigerung der Genauigkeit die Eingabe von so genannten Markern, über die man in einzelnen Fotos markante Punkte mit bekannten Koordinaten inkl. Höhe markieren kann, sowie die Auswertung von GPS Informationen in den EXIF-Informationen der Bilder. Für das gezeigte Beispiel von Sylt lagen nur die GPS Informationen vor, so dass es Abweichungen zur tatsächlichen Geländehöhe geben kann.



Screenshot von "PhotoScan" mit einem berechneten 3D-Modell der Befliegung der Südspitze von Sylt.

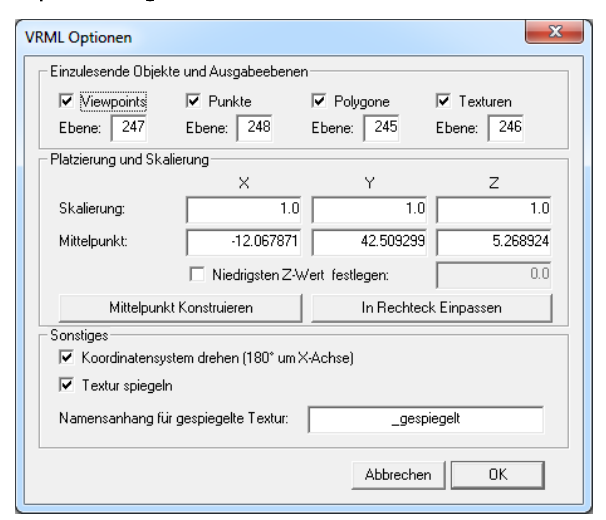
Funktionsübersicht und Arbeitsabläufe

EDA-K enthält ein spezielles Menü („3D-Auswertung“), in dem alle Befehle zusammengefasst wurden, die für die Auswertung der 3D-Modelle nützlich sein können.

Die Auswertung der 3D-Modelle in EDA-K beginnt immer zuerst mit dem Import der “PhotoScan“-Modelle. Die entsprechende Funktion liest zunächst die Datei ein und überprüft ihre allgemeine Struktur. Im Anschluss hat der Nutzer die Wahl, welche Objekte und auf welche Weise er die gewählten Objekte importieren will. Folgende Objekttypen stehen dabei zur Auswahl:

- Viewpoints: Hierbei handelt es sich um die Kamerapositionen, die für eine Georeferenzierung des Modells nützlich sein können.
- Punkte: Die Eckpunkte der einzelnen Modelloberflächen sind für die Geländemodelle wichtig und stellen somit in den meisten Fällen das Minimum an zu importierenden Daten dar.
- Polygone: Die Polygone sind die eigentlichen Flächen, aus denen das Modell zusammengesetzt ist. Diese Daten sind in den meisten Fällen zu vernachlässigen, bieten aber einen besseren optischen Eindruck, als wenn nur die Eckpunkte importiert werden würden.
- Texturen: Der Import der Texturdatei funktioniert nur bei Texturen die als „Orthophoto“ erzeugt wurden. Die Textur ermöglicht eine bessere Orientierung innerhalb des dargestellten Gebietes.

Weiterhin kann der Nutzer auf verschiedene Arten die geographische Lage und Skalierung des Modells bestimmen (nur nötig, wenn die Standard-Version von „PhotoScan“ oder Photos ohne GPS-Positionen und Marker verwendet wurden). Es kann entweder der Mittelpunkt in der Karte gewählt werden oder das Modell in einen rechteckigen Bereich eingepasst werden. Direkte Eingaben der Mittelpunkt-koordinaten und der Skalierungen sind ebenfalls möglich. Es kann außerdem notwendig sein, dass das Koordinatensystem gedreht werden muss oder dass die Textur gespiegelt werden muss, weswegen es auch dafür Optionen gibt.



Dialog zum Import einer VRML-Datei aus “PhotoScan” in EDA-K

Nach dem Import stehen die einzelnen Modellteile als GIS-Objekte zur Verfügung und die GIS-Objekte wurden in einer so genannten Folge zusammengefasst, so dass alle Objekte gemeinsam bearbeitet werden können.

Im weiteren Verlauf bietet EDA-K Funktionen an, mit denen diese Objektfolge auf verschiedenen Wegen transformiert und georeferenziert werden kann:

Die Funktion „Georeferenzieren“ berechnet die Räumliche Lage über eine zweidimensionale Helmert-Transformation. Die Höhenwerte der Objekte werden dabei zwar ebenfalls skaliert, aber Drehungen und Verschiebungen des Modells bleiben auf die XY-Ebene beschränkt. Um eine Transformationsmatrix berechnen zu können, müssen hier Passpunktpaare eingegeben werden, die bestimmen, welcher Punkt im Ausgangsdatensatz welchem Punkt im Zielkoordinatensystem entspricht. Als optische Hilfe für die Eingabe der Passpunkte bieten sich hier einerseits die Texturen, andererseits aber auch die Polygone an.

Die Funktion „Z-Werte Transformieren“ erlaubt es die Folge entlang der Z-Achse zu verschieben oder zu skalieren und bietet damit eine Ergänzung zur zweidimensionalen Georeferenzierung.

Als letzte Funktion gibt es noch die Funktion „3D-Transformation“, bei der eine dreidimensionale Helmert-Transformation durchgeführt wird. Dabei werden bei der Berechnung der Transformationsmatrix ebenfalls Höhenwerte benötigt, so dass das Modell durch diese Funktion frei im Raum gedreht, verschoben und skaliert werden kann. Sofern das Flugprotokoll geladen wurde und die Viewpoints aus „PhotoScan“ importiert wurden, lässt sich hier auch automatisch eine Zuordnung der notwendigen Passpunktpaare erzeugen, die bei Bedarf auch bis zu einem einzustellenden Schwellenwert ausgedünnt werden kann.

Im weiteren Verlauf können aus den so importierten und ggf. georeferenzierten Punkten Geländemodelle berechnet werden, auf die weitere Auswertungsfunktionen angewendet werden können.

Geländemodelle

Viele der speziellen Auswertefunktionen für den Küstenschutz basieren auf Geländemodellen, die aus den 3D-Modellen abgeleitet werden können. In diesem Abschnitt soll zunächst ein Überblick über die Datenstruktur für Geländemodelle gegeben werden und im Anschluss eine Übersicht über den Funktionsumfang gegeben werden. Dabei wird ein Schwerpunkt auf die Anwendungen im Küstenschutz gesetzt.

Beschreibung der Geländemodelle

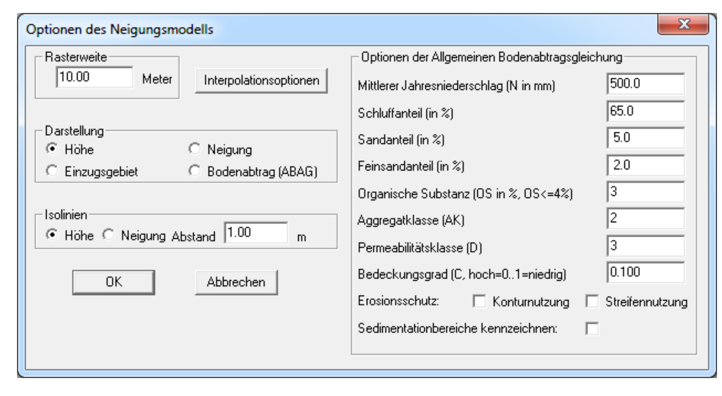
Die in EDA-K verwendeten Geländemodelle bestehen aus einem gleichmäßigen Raster aus quadratischen Objekten (geschlossene Polygone). Jedem Rasterelement sind dabei mehrere Objektvariablen zugeordnet. Die Geländehöhe steht dabei üblicherweise im Attribut „GMHOEHE". Geländemodelle werden innerhalb des Programms aus so genannten Stützpunkten berechnet. Dabei handelt es sich im Punktobjekte, in denen zusätzlich eine Höhe gespeichert ist.

Geländemodelle können auf verschiedene Arten angezeigt werden. Neben der Anzeige der Höhe ist beispielsweise noch eine Anzeige der Neigung oder des Einzugsgebietes möglich. Das Programm hält für eine schnellere Umschaltung zwischen diesen Darstellungsmethoden einige Werte im Speicher, die nicht in den von EDA-K normalerweise verwendeten WPC-Dateien abgespeichert werden. Es besteht jedoch die Möglichkeit diese Daten in eine HNM-Datei zu speichern und wieder zu laden. Diese Art von Daten kann auch nur für ein einziges (aktives) Geländemodell vorgehalten werden. Für die Arbeit mit den unten beschriebenen Funktionen sind diese Informationen jedoch nicht notwendig.

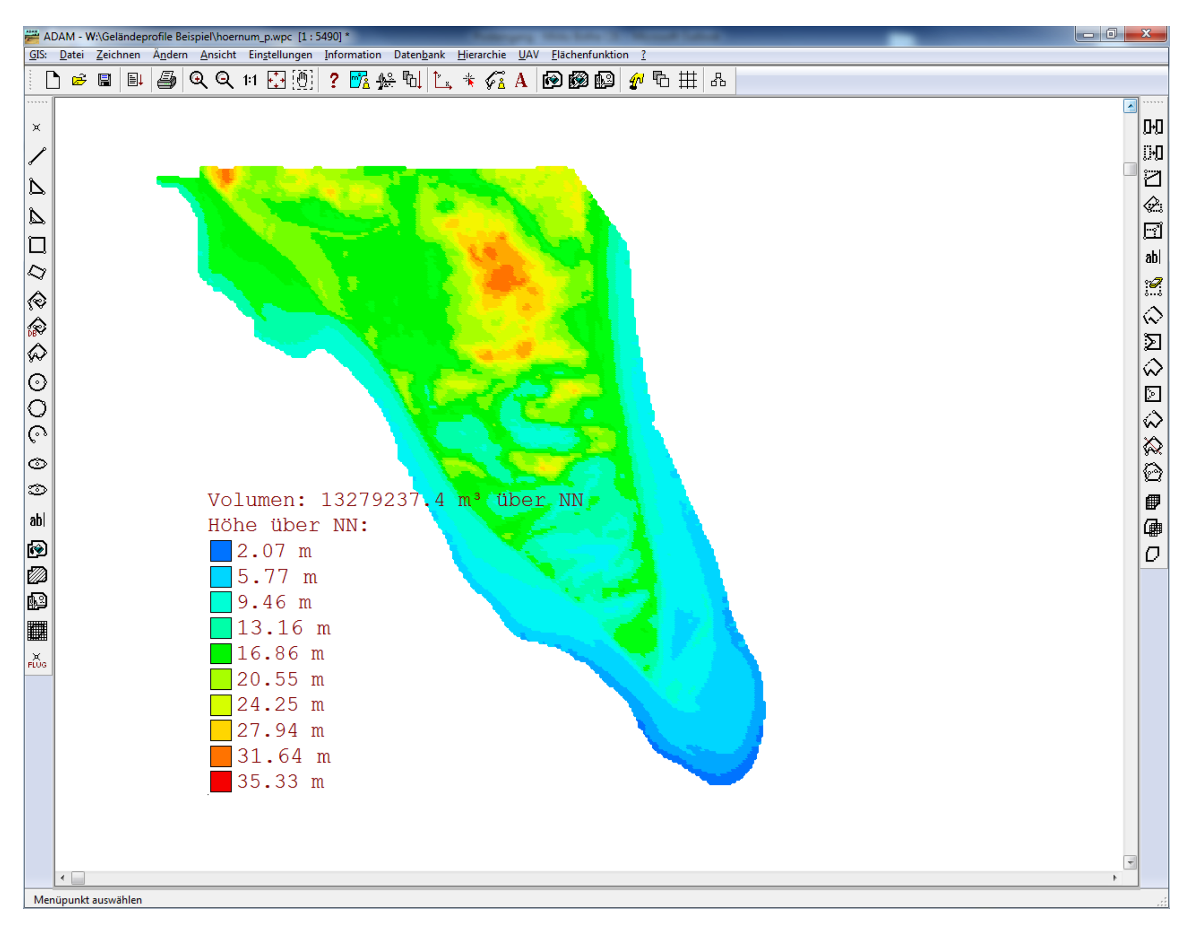
Funktionsübersicht und Arbeitsabläufe

Auch die Funktionen für die Arbeit mit Geländemodellen wurden im Menü „3D-Auswertung" eingefügt. Die Funktionen befinden sich bis auf das Erzeugen und das Speichern in einem Untermenü namens „Geländemodell". Manche Der Funktionen benötigen von vornherein ein oder sogar zwei vorberechnete Geländemodelle, andere berechnen die benötigten Modelle als Zwischenschritt automatisch. In beiden Fällen muss der Nutzer jedoch dieselben Einstellungen vornehmen und vorbereitende Arbeiten ausführen.

Zunächst muss, sofern noch keines vorhanden ist, ein geschlossenes Polygon erzeugt werden, dass den Bereich angibt, für den die Berechnungen ausgeführt werden sollen. Dieses Objekt benötigt keine weiteren Sachdaten. Nach dem Start der Funktionen, die ein Geländemodell (ggf. als Zwischenergebnis) erstellen, werden in einem Dialog u.a. die Rasterweite und die Darstellungsmethode eingestellt. Anschließend muss das Randpolygon ausgewählt werden.



Dialog zur Eingabe der Parameter des Geländemodells



Geländemodell der Südspitze von Sylt in EDA-K. Aufgrund fehlender Marker in „PhotoScan" kam es zu einer Verkippung des Modells mit zu großen Höhen im Norden.

Nach der Eingabe der Parameter werden die (teilweise zeitintensiven) Berechnungen durchgeführt und Anschließend je nach Funktion das berechnete Geländemodell oder das daraus abgeleitete Ergebnis angezeigt.

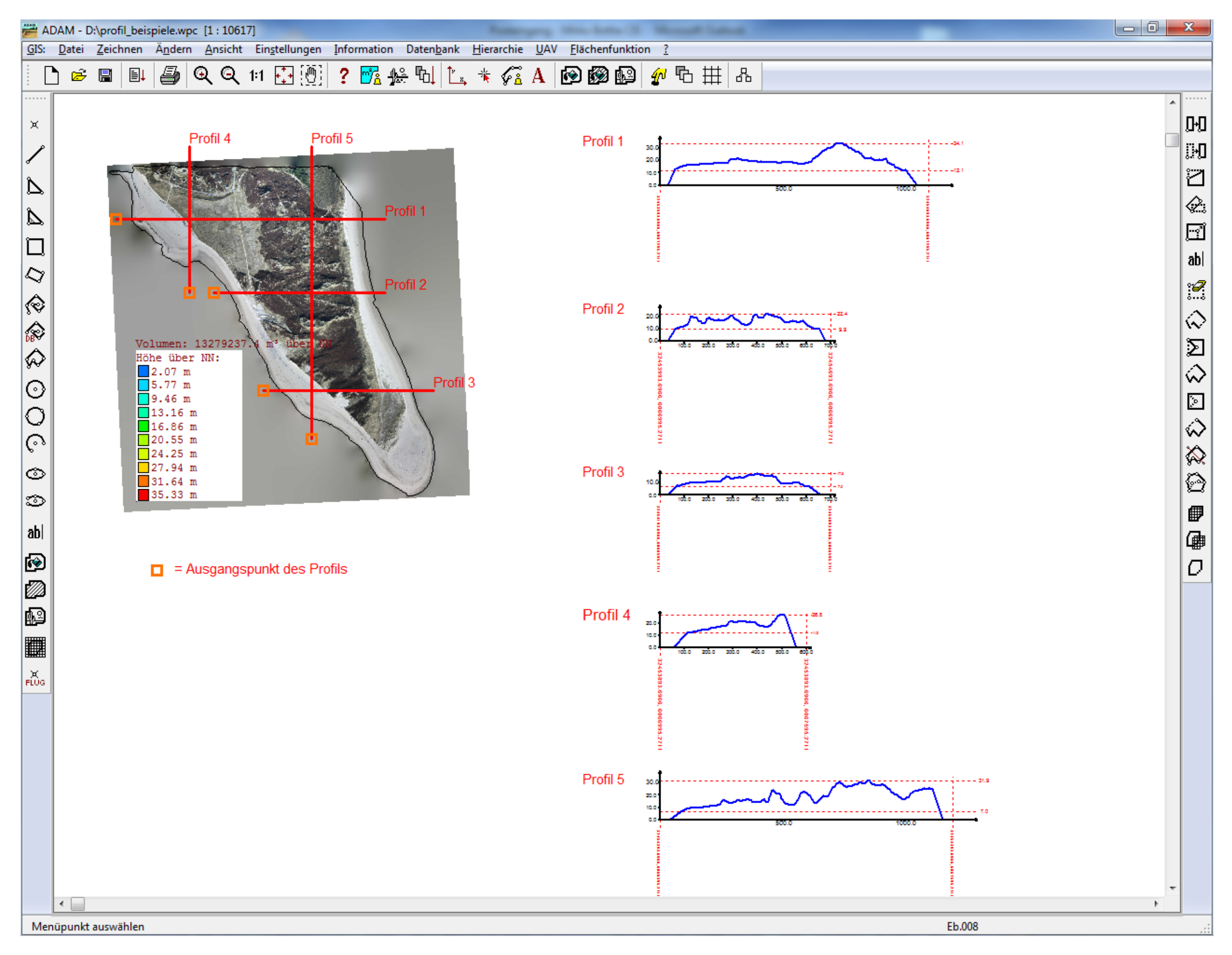
Die Funktionen „Differenz Berechnen“ und „Differenz aus Punkten Berechnen“ funktionieren abgesehen von den Eingabedaten identisch. Beide Funktionen berechnen ein Differenzgeländemodell, indem die Höhenwerte von zwei Geländemodellen, deren Raster exakt übereinander liegen muss, voneinander abgezogen werden. Der Unterschied besteht darin, dass die Geländemodelle bei „Differenz Berechnen“ schon erstellt worden sein müssen, während bei „Differenz aus Punkten Berechnen“ zuerst zwei Geländemodelle aus Stützpunkten berechnet werden. In diesem Fall können die Zwischenergebnisse auch gespeichert werden.

Auch die Funktion „Aufschüttungsvolumen“ berechnet als Zwischenschritt zwei Geländemodelle und benötigt auf jeden Fall die Stützpunkte. Diese Funktion dient jedoch dazu, ein Volumen abschätzen zu können, wenn man nur die Stützpunkte für ein einziges Modell hat. Man muss zunächst (vor der Auswahl des Menüpunktes) ein geschlossenes Polygon um den Bereich zeichnen, für den das Volumen abgeschätzt werden soll.

Die Funktion berechnet dann ein Geländemodell mit allen Stützpunkten und eines, bei dem die Stützpunkte im ausgewählten Bereich durch linear interpolierte Stützpunkte ersetzt wurden, die den Bodenverlauf abschätzen sollen. Anschließend wird das Volumen der Differenz berechnet und am Bildschirm und als Objektvariable an der Gebietsumrandung ausgegeben.

Als nächstes gibt es noch die Funktion „Füllungsvolumen“. Damit lässt sich das Volumen berechnen, mit dem man das Geländemodell befüllen müsste, bis eine vom Nutzer festzulegende Füllhöhe an einem ebenfalls nutzerbestimmten Punkt erreicht wird. Dabei wird sowohl das Volumen als auch die insgesamt befüllte Fläche ausgegeben. Diese Funktion ist z.B. sinnvoll um festzustellen, wieviel Fläche überflutet wird, wenn eine Geländehohlform bis zu einem bestimmten Stand mit Wasser vollläuft.

Zuletzt besteht die Möglichkeit aus einem bestehenden Geländemodell ein Geländeprofil zu berechnen. Der Nutzer muss die Ebene mit dem Geländemodell und die zu verwendende Objektvariable auswählen und anschließend den Verlauf des Profils als Linie eingeben. Es ist dabei auch möglich ein Profil über mehrere Streckenabschnitte hinweg zu verfolgen. Die eingegebenen Punkte werden dabei auch im Ergebnisprofil markiert. Das Profil wird anschließend in einer neuen Datei angezeigt. Bei der Ausgabe der Profillinie kann der Nutzer zwischen einer geglätteten und einer ungeglätteten Variante wählen. Ohne Glättung enthält das Profil an den Stellen, an denen der Verlauf das Geländeraster schneidet, große plötzliche Sprünge, während bei der Glättung zwischen den Mittelpunkten einer Teilstrecke interpoliert wird. Um eine größere Vergleichbarkeit unterschiedlicher Profile zu erhalten kann der Nutzer noch zwei Einstellungen zur Überhöhung und zur Schriftgröße vornehmen, wobei das Programm hier schon Werte vorschlägt.



Südspitze von Sylt und berechnete Geländeprofile in EDA-K.

Die im Rahmen des LEDA-K2 Projektes entstandene Software EDA-K ist zur speziellen Auswertung von UAV-Bildern im Küstenschutz bestimmt und hierfür von der CiS GmbH erstellt worden. Dabei wurden Komponenten eines GIS-Werkzeugkastens der CiS verwendet, die mit genutzt werden können.

Die Nutzung der Software ist zunächst für öffentliche Institutionen (des Küstenschutzes) frei und kann über die Projektleitung bezogen werden:

„Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg

Dezernatsgruppe Küste

(Herr Dr. Lars Tiepolt)

Erich-Schlesinger-Str. 35

18059 Rostock

Die Kostenfreiheit gilt derzeit nicht für Firmen und andere kommerzielle Anwendungsgebiete.

CIS gewährleistet für ein Jahr die Beseitigung nachweislicher Fehler, für die speziell für den Küstenschutz entwickelten Komponenten.

Jegliche Haftung für Folgeschäden, die sich aus der Softwarenutzung ergeben ist ausgeschlossen.

Zur Nutzung des vollen Funktionsumfanges benötigt man ein externes Photogrammetrieprogramm, das nicht im Lieferumfang enthalten ist.

Die CiS GmbH empfiehlt das Programm PhotoScan der Firma Agisoft oder Photomod der Firma Racurs.

Die Nutzungsrechte für beide Programme und Schulungen können käuflich über CIS erworben werden.

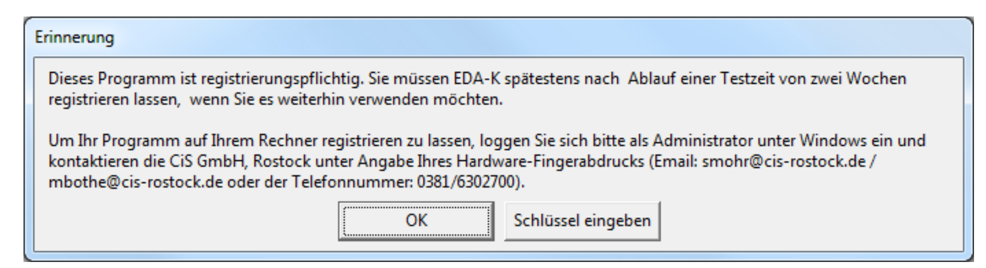
Schulungen werden auch zu EDA-K und zur Flugplanungs- und Flugdurchführungssoftware angeboten.

In Verbindung mit dem Erwerb von UAV-Technik von der CiS GmbH sind diese Schulungen kostenfrei.

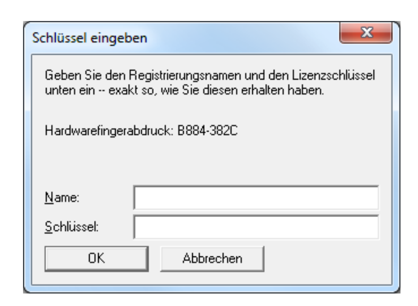
Um EDA-K auf Ihrem Windows Rechner zu installieren, führen Sie bitte das Setup ***Setup_EDA-K.exe*** aus. Die GIS Anwendung wurde unter Windows Versionen ab Windows XP bis Windows 7 getestet.

Installationshinweise für die externe Photogrammetriesoftware sind gesondert erhältlich.

Nach einer Testphase von einigen Tagen ist zum Starten der GIS Anwendung die Eingabe eines Lizensschlüssels erforderlich. Beim Start von *EDA-K* wird sich daher ein Fenster mit Hinweisen zur Registrierung öffnen:



Der "*Schlüssel eingeben*" Button öffnet das Dialogfenster zur Eingabe der Registrierungsnummer:



Bitte übermitteln Sie den hier angegebenen *Hardwarefingerabdruck* Ihres Computers der CiS GmbH (per Email unter Angabe des zu registrierenden Programms an mbothe@cis-rostock.de oder smohr@cis-rostock.de), um den Registrierungs-*Schlüssel* zu erhalten. Nachdem Sie den Schlüssel erhalten haben, müssen Sie die Daten in die entsprechenden Eingabefelder eingeben und auf „*OK*" klicken.

In Abhängigkeit von Ihrer Windows Version, brauchen Sie möglicherweise Administrator-Rechte, um diese Software ordnungsgemäß zu registrieren. Bitte wenden Sie sich vor der Installation an Ihren Systemadministrator!

8. Nutzen und Verwendbarkeit, Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die erarbeiteten Ergebnisse haben Eingang in zukünftige Aufnahmeverfahren der Dezernatsgruppe Küste gefunden, gleichzeitig besteht Interesse von Seiten des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern in Güstrow zur Übernahme der Technik für Flussbereiche und von den Staatlichen Ämtern für Landwirtschaft und Umwelt in Stralsund und Schwerin für Fragestellungen im Küstenbereich in Zusammenarbeit mit der Dezernatsgruppe Küste.

Der Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN) war über den Ablauf und die Ergebnisse informiert. Der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) wurde ebenfalls über die Projektergebnisse informiert und es wurden im Herbst 2013 Testmessungen mit beiden Systemen aus LEDA-K und LEDA-K2 auf der Insel Juist durchgeführt und die entwickelten Techniken und Verfahren vorgestellt.

Die Katastrophenleitstelle der norddeutschen Bundesländer in Cuxhaven hat Interesse an den Systemen angemeldet und die UAV/UAS-Ergebnisse wurde auf einem dreitägigen Workshop der Beauftragten der Bundesländer für den Katastrophenschutz in Hamburg während eines Vortages und einer Demo am 10. Oktober 2014 vorgestellt.

Der Fachbereich Landschaftsgestaltung und Landschaftsarchitektur der Hochschule Neubrandenburg, wo das Projekt LEDA-K während Vorträgen und im Rahmen einer Lehrveranstaltung vorgestellt wurde, hat sich mittlerweile eine UAV bei der Firma CIS GmbH in Rostock mit den aus dem Projekt hervorgegangenen neuen Konfigurationen beschafft, um diese in der Lehre, bei Praktika und Auftragsbearbeitungen anzuwenden.

Die Deponie Rosenow hat erste Testflüge mit einem UAS plus Kamerasystem zur Festellung der gelagerten Volumina erfolgreich getestet, wobei auch schon die neu entwickelte Software EDA-K zum Einsatz gekommen ist.

9. Fortschritt

Alle vorgesehenen Arbeiten konnten termingemäß fertig gestellt werden. Eine Reihe von Ergebnissen führen aber zu dem Schluss, dass nicht alle theoretischen Ansatzpunkte aus dem Projektantrag tatsächlich praxisrelevant einsetzbar sind, so wurde im Endeffekt durch eine effiziente Vorauswahl nur ein Kleinstscanner zum tatsächlichen Praxiseinsatz entwickelt und die rasante Entwicklung der Photogrammetrie führte zu einer zusätzlichen Entwicklung eines Kopters mit Kamera für die Geländemodellierung, parallel und kostenneutral zum Projektantrag bzw. -laufzeit (Siehe Ergebnisse). Die enge Verzahnung von behördlichen und mittelständischen Ansätzen und Herangehensweisen garantierte, dass alle Lösungen letztendlich auch allen Nutzern in den Küstenbereichen von Nord- und Ostsee für die jeweiligen Aufgabenstellungen sinnvoll und praxisrelevant zur Verfügung gestellt werden können. Durch die Einbindung des KfKI (Kuratorium von Forschung im Küsteningenieurwesen) ist eine direkte Zugriffsmöglichkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse auf alle behördlichen, wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Akteure in den Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein, Niedersachsen sowie den Hansestädten Hamburg und Bremen gesichert.

10. Veröffentlichungen

In der 9-monatigen Projektlaufzeit gab es keine Publikationen oder schriftliche Veröffentlichungen. Es wurde aber eine Reihe von Vorträgen gehalten. Desweiteren haben die Verfahren Eingang in die Vortragsfolien der Dezernatsgruppe Küste gefunden und sind somit Teil aller Küstenschutzvorträge und -exkursionen durch diese Mitarbeiter. Die erstellte Software ist im Dienstgebrauch und wird in Verbindung mit UAS/UAV-Flügen eingesetzt.

11. Patente

Es wurde keine Patente zur Anmeldung gebracht und es sind auch keine patentrechtlichen Schritte geplant!

12. Quellen

Alle Abbildungen und Fotos sind projektbezogen entstanden und von den beteiligten Firmen/Institutionen erstellt/aufgenommen worden:

- Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg
- Milan Geoservice GmbH
- CIS Gmbh Rostock

15. Dezember 2014

gez. Tiepolt

Dr. Lars Tiepolt
Dezernatsgruppe Küste
Dezernat Allgemeine Angelegenheiten und Küstenkunde
Erich-Schlesinger-Str. 35
18059 Rostock
Tel: 0381 331 67-604
Fax: 0381 331 67-799
E-Mail: lars.tiepolt@stalumm.mv-regierung.de

Anlage
Hilfe der Software EDA-K